DIE NATURWISSENSCHAFTEN

WOCHENSCHRIFT FÜR DIE FORTSCHRITTE DER NATURWISSENSCHAFT, DER MEDIZIN UND DER TECHNIK

HERAUSGEGEBEN VON

DR. ARNOLD BERLINER UND PROF. DR. AUGUST PÜTTER

Siebenter Jahrgang. 12. September 1919. Heft 37.

Neue Rekonstruktion der Flugsauriergattungen Pterodactylus und Rhamphorhynchus.

Von Dr. Othenio Abel,

o. ö. Professor der Paläobiologie an der Wiener Universität.

Schon die ersten vollständigeren Funde der beiden Flugsauriergattungen Pterodactylus und Rhamphorhynchus in den lithographischen Schiefern Bayerns, die der oberen Juraformation angehören, regten zu Versuchen einer Rekonstruktion dieser höchst eigenartig spezialisierten Reptilien an, die seit dem Ende der Kreideformation ausgestorben sind. *Collini*, der ein trefflich erhaltenes Skelett von Pterodactylus longirostris Cuv. aus den Schiefern von Eichstädt in Franken 1784 beschrieb, war der Ansicht, daß dieses Reptil eine aquatische Lebensweise geführt haben müsse, und noch mehrere Jahrzehnte später (1830) verglich *Wagler* Pterodactylus mit einer Seeschildkröte, obwohl schon *Cuvier* (1801) zuerst den überzeugenden Nachweis dafür erbracht hatte, daß Pterodactylus ein Flugtier gewesen sein müsse.

Seit dieser Zeit sind viele weitere Funde von Pterodactylusskeletten gemacht und unsere Kenntnisse vom anatomischen Baue dieser Flugreptilien wesentlich erweitert worden. Unsere Vorstellungen vom Aussehen des Pterodactylus sind aber seit den Rekonstruktionsversuchen aus der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts nicht weiter ausgebaut worden; erst in den letzten Jahren habe ich es versucht, eine neue Rekonstruktion des kleinen Pterodactylus spectabilis zu entwerfen. Wir haben jedoch fast nur Versuche zu verzeichnen, die sich auf die Darstellung *fliegender* und *kletternder* Exemplare beziehen, während es bisher fast nicht versucht worden war, diese Tiere in verschiedenen anderen Körperstellungen, z. B. in der *Ruhestellung*, zu rekonstruieren. Eine Ausnahme machen die Zeichnungen *Seeleys* in dessen Buche „Dragons of the Air" (London 1901), in denen der Versuch unternommen wurde, die Tiere *gehend* und *stehend* darzustellen.

Die Zeichnungen *Seeleys* sind schon bei dem Erscheinen seines Buches infolge des karikaturenhaften Eindruckes, den sie auf den Beschauer ausüben, allgemein belächelt worden und entsprechen in der Tat keinesfalls der Vorstellung, die wir uns von dem Aussehen und der allgemeinen Körperhaltung von Pterodactylus entwerfen müssen.

Wiederholte Versuche, dieses Flugreptil der Juraformation in anderen Stellungen als im Fluge zu rekonstruieren, haben mich zu der Überzeugung geführt, daß wir uns auf einem verfehlten Wege befunden haben. *Seeley* und andere Forscher sind von der Annahme ausgegangen, daß Pterodactylus auf dem festen Boden zu gehen vermochte und sich dabei auf die Handwurzel und auf die Fußflächen der zart und schlank gebauten Hinterbeine stützte. Bei dieser Annahme war die karikaturenhaft wirkende Rekonstruktion, wie sie in *Seeleys* Buche zur Darstellung gebracht erscheint, unvermeidlich.

Die Lösung des Problems der Rekonstruktion von Pterodactylus in anderen Stellungen als während des Fluges, die bisher wenigstens in den Grundzügen gelungen war, liegt in der Erkenntnis, daß die Analogie der Pterodactylen mit den Fledermäusen eine viel weitergehende ist, als vielfach angenommen wurde. Nun gehen aber bekanntlich die Fledermäuse niemals mit erhobenem Körper auf dem festen Boden. Wenn sie sich überhaupt auf dem ebenen Boden fortbewegen, so erfolgt diese Lokomotion in der Weise, daß das Tier mit dem Bauche dem Boden aufliegt und dadurch vorwärts kommt, daß es mit den Armen ausgreift und unter zitternden, tastenden Bewegungen nach einem Stützpunkte für die Daumenkralle sucht, an der es sich dann nach vorwärts zieht; dabei wirken die Hinterbeine, die in weit gespreizter Stellung gehalten werden, nur so weit mit, daß sie den Körper ein wenig in die Höhe stemmen. Sonst aber bleiben sie in eigentümlicher, „verdrehter" Stellung, da die Sohlenflächen des Hinterfußes zwar dem Boden aufgesetzt, aber die Zehenspitzen dabei nach hinten und außen gerichtet werden. Wenn sich das Tier zum Auffliegen vom Boden aus anschickt, so stemmt es den Hinterkörper mit den Hinterbeinen ein wenig empor, macht einige Flatterschläge und schwingt sich dann in die Höhe. Die Oberschenkel einer auf dem Boden kriechenden Fledermaus nehmen eine Stellung ein, die an jene der Frösche erinnert.

Eine Streckung der Hinterbeine tritt bei den Fledermäusen nur dann ein, wenn sie mit ihren Hinterfüßen an Baumästen, Felsvorsprüngen und dergl. aufgehängt sind und dabei *den Körper nach unten herabhängen* lassen. Auch das Klettern der Fledermäuse erfolgt in der Regel in der Weise, daß sie sich teils mit den Daumenkrallen, teils mit den Hinterfüßen abwechselnd und dabei vorgreifend weiterbewegen und dabei den Körper nach unten herabhängen lassen. Diese Stellung sehen wir z. B. bei einem

kletternden Flughund oder Kalong (Pteropus celaeno) in typischer Ausbildung (Fig. 1).

Wir werden daher annehmen dürfen, *daß sich auch die Pterodactylen höchstens ausnahmsweise auf dem festen Boden fortbewegten und dann genau dieselbe Haltung wie eine auf dem Boden kriechende Fledermaus einnahmen.* Wir werden weiter annehmen müssen, daß sie sich, wenn sie nicht flatternd auf Nahrungssuche ausgingen, in derselben Weise wie die Fledermäuse, also mit dem Körper nach unten herabhängend, im Geäste der Bäume oder in Felsspalten kletternd aufhielten (Fig. 2). Im Ruhezustand werden sie sich wahrscheinlich genau so wie die Fledermäuse mit den Hinterbeinen aufgehängt haben, eine Stellung, von der aus sie durch Spreizen der Flügel sehr leicht in die Flugstellung übergehen konnten, was nicht so leicht möglich gewesen wäre, wenn sie sich auch mit den Krallen der freien Finger oder nur mit diesen allein an Ästen und dergl. aufgehängt hätten. Die verschiedenen Skizzen, die ich von den kletternden, schlafenden und zum Abfliegen bereiten Pterodactylen zu entwerfen versucht habe (Fig. 2—5), dürften zeigen, daß diese Rekonstruktionsbilder nicht mehr einen so unnatürlichen und unwahrscheinlichen Eindruck hervorrufen, wie die Rekonstruktionsversuche *H. G. Seeleys*, die ebenso unnatürlich wirken, als wenn wir z. B. das Bild eines kletternden Flughundes (Fig. 1) um 180° drehen und ihn auf dem Boden gehend mit hoch über dem Boden gehaltenen Körper darstellen würden.

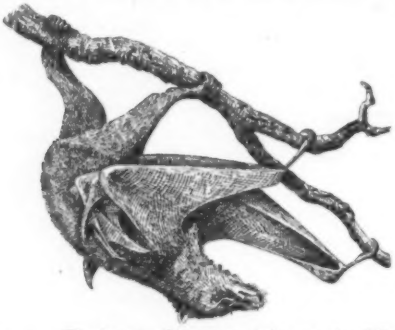

Fig. 1. Flughund (Pteropus celaeno) in Kletterstellung. (Nach *Brehm.*)

Um zu einer befriedigenden Vorstellung von dem Aussehen, der Bewegungsart und überhaupt der gesamten Lebensweise der Pterodactylen zu gelangen, ist es notwendig, sich streng an die analogen Verhältnisse bei den lebenden Fledermäusen zu halten. So wie diese werden die Pterodactylen auch wahrscheinlich erst bei einbrechender Dunkelheit auf die Jagd gegangen sein; wir sind schon seit längerer Zeit zu der Erkenntnis gelangt, daß ihre Nahrung hauptsächlich aus Fischen bestanden haben dürfte, die sie ähnlich wie die Wasserfledermäuse von der Oberfläche der Gewässer während des Fluges erhaschten (Fig. 6).

Stellt uns also Pterodactylus einen ausgestorbenen Reptiltypus dar, der in der Juraformation den Anpassungstypus der heutigen Fledermäuse vertrat, so müssen wir uns anderseits davor hüten, auch in seinem Zeitgenossen Rhamphorhynchus einen analogen Anpassungstypus zu erblicken. Schon 1912 habe ich in meiner „Paläobiologie der Wirbeltiere" betont, daß

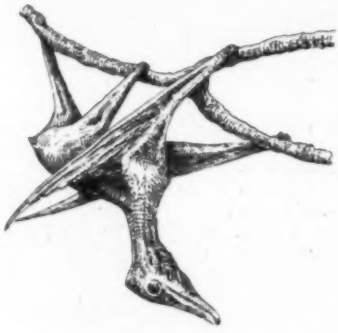

Fig. 2. Pterodactylus suevicus aus dem oberen Jura Bayerns, in Kletterstellung rekonstruiert (Originalzeichnung).

Fig. 3.

Fig. 4.

Rekonstruktionen von Pterodactylus suevicus in Hängestellung (Originalzeichnungen).

Rhamphorhynchus in scharfem Gegensatze zu Pterodactylus steht, da dieser Flugsaurier nicht als ein *Flatterflieger*, sondern als ein *passiver Drachenflieger* oder *Segler* zu betrachten ist. Seine langen, schmalen und sehr spitz zulaufenden Flügel erinnern in auffallender Weise an die Flügelformen der Segler, des Scherenschnabels, der Fregattvögel usw., kurz jener Vögel, die zwar sehr schnell zu fliegen und weite Strecken ohne ersichtliche Ermüdung zurückzulegen vermögen, aber keine oder doch nur sehr seltene Flügelschläge während des Fluges aus-

führen, so wie dies auch für unsere großen Tagraubvögel bezeichnend ist.

Zu den Eigentümlichkeiten von Rhamphorhynchus wie der ganzen Gruppe seiner Verwandten darf der lange, von auffallend starken und straffen Sehnen gespannte und versteifte Schwanz gelten, der am Ende ein horizontal

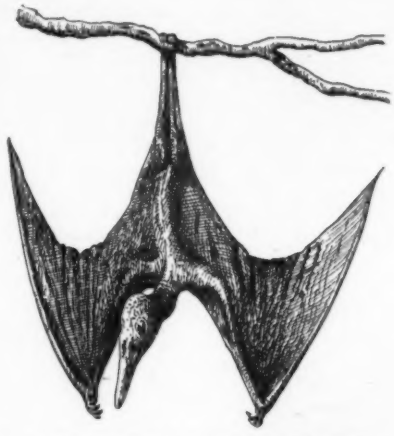

Fig. 5. Rekonstruktion von Pterodactylus suevicus in Abflugstellung (Originalzeichnung).

stehendes, rhombisches Hautsegel trug, das vom flugtechnischen Standpunkte aus nur als ein *Höhensteuer* bewertet werden kann. Wie bei Pterodactylus besteht die Flugfläche aus einer Hautduplikatur, die sich zwischen den Seiten des Rumpfes und dem zu einem Flugfinger verlängerten vierten Finger ausspannte und bei mehreren Exemplaren von Rhamphorhynchus aus den lithographischen Schiefern Bayerns im Abdrucke trefflich erhalten ist, gleichwie das rhombische, von stärkeren Querleisten gestützte Schwanzsegel.

In meiner letzten, im Jahre 1912 veröffentlichten Rekonstruktion von Rhamphorhynchus Gemmingi in Flugstellung habe ich versucht, die Rolle des fünften Zehenstrahls als Spannknochen der Flughaut zur Darstellung zu bringen. Zweifellos fällt diesem Zehenstrahl die Aufgabe zu, das Hinterende der vom Flugfinger gegen die Körperflanke ziehenden Flughaut zu spannen. Diese Aufgabe fiel wohl schon dem fünften Zehenstrahl der ältesten Vertreter der Rhamphorhynchoidea, wie z. B. des Dimorphodon macronyx aus dem englischen Lias zu, wie die deutlich zu beobachtende abgeknickte Stellung dieser Zehe in Beziehung zu den übrigen Zehen beweist. Neuere Studien haben mich jedoch zu der Überzeugung geführt, daß auch dem Unterschenkel dieselbe Rolle zugefallen sein muß. Wenn wir das Tier dementsprechend rekonstruieren (Fig. 7), so ergibt sich, daß der Verlauf des Hintersaumes der Flughaut derartig ist, daß er sich ohne Unterbrechung ganz allmählich in die Schwanzlinie als gleichmäßig geschwungene Kurve fortsetzt.

Schon 1912 habe ich dargelegt, daß aus der Gestalt der Kiefer von Rhamphorhynchus der Schluß gezogen werden darf, daß diese Reptilien in ähnlicher Weise wie die Scherenschnäbel Afrikas und Südamerikas an der Oberfläche ruhiger Gewässer auf Fische jagten, die sie mit ihren Unterkiefern, förmlich die Wasseroberfläche durchpflügend, in die Höhe warfen und dann mit den zusammenklappenden Schnäbeln wie mit einer Zange erfaßten, worauf die Beutetiere unzerbissen verschluckt wurden. Fortgesetzte

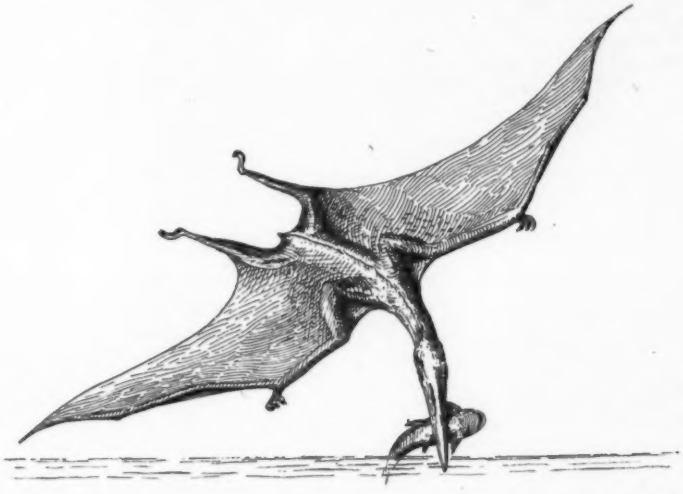

Fig. 6. Rekonstruktion von Pterodactylus suevicus in Flugstellung, ungefähr in ⅙ der nat. Gr. (Originalzeichnung).

Untersuchungen über die Anpassungen von Rhamphorhynchus und Vergleiche mit analogen Anpassungsformen unter den lebenden Vögeln haben mir die Gewißheit verschafft, daß die Übereinstimmung zwischen Rhamphorhynchus und dem lebenden Scherenschnabel (Rhynchops) sich nicht nur auf die Jagdmethode beschränkt, sondern auch auf die anderen Lebensgewohnheiten erstreckt. Bei Betrachtung der von der Meisterhand *Kuhnerts* gemalten Tafel in der neuen Auflage von *Brehms* „Tierleben", welche den Scherenschnabel im ruhenden Zustande, und zwar auf dem Ufersande liegend darstellt, ist die Ähnlichkeit in der allgemeinen Körperform mit der eines Rhamphorhynchus geradezu überraschend. Wir müssen die Frage aufwerfen, ob nicht auch die Rhamphorhynchen tagsüber in derselben Weise auf dem Ufersande zu liegen pflegten und sich erst gegen Anbruch der Dämmerung auf die Jagd begaben. Wenn Rhamphorhynchus dieselbe Ruhestellung wie der lebende Scherenschnabel eingenommen hat, so ist zunächst die Frage zu beantworten, wie dies mit dem für Rhamphorhynchus anzunehmenden Segelfluge in Einklang zu bringen ist. Wir müssen prüfen, ob es dem Tiere möglich war, sich aus der liegenden Stellung zum Fluge zu erheben, ohne daß ein Abfliegen von einem erhöhten Abflugplatze, etwa von einem Baumaste oder von einem Felsen, erforderlich war.

Die Antwort darauf gibt uns die Art und Weise, wie sich der Mauersegler (Cypselus apus) vom flachen Boden aus in die Luft zu schwingen vermag. Dieses Tier, dessen Flug als das typische Beispiel eines Segelfluges unter den lebenden Flugtieren gelten kann, wobei lange Zeit hindurch kein einziger Flügelschlag das ruhige Dahingleiten und Schweben unterbricht, ist nur in den Lüften heimisch, auf dem Boden dagegen äußerst unbeholfen. Vom Gehen ist bei diesem Vogel keine Rede mehr; er vermag nicht einmal zu kriechen. Legt man einen Mauersegler auf den Boden, so breitet er sofort seine Schwingen weit aus, schnellt sich durch einen kräftigen Schlag derselben auf den Boden in die Höhe und geht sofort in den Segelflug über.

Betrachten wir die Rekonstruktion eines fliegenden Rhamphorhynchus und versuchen wir es, dieses Reptil in ruhender Stellung nach dem Vorbilde einer Fledermaus oder eines Pterodactylus mit dem Körper nach abwärts hängend und mit den Füßen an einen Baumast geklammert zu rekonstruieren, so wird ein solcher Rekonstruktionsversuch sofort erkennen lassen, daß diese Haltung und Stellung für das Tier eine durchaus unnatürliche ist. Auch wenn wir das Tier derart an einem Aste hängend rekonstruieren, daß wir es mit den Krallen der drei freien Finger jeder Hand an dem Aste festgeklammert und den Körper mit dem langen Schwanze nach abwärts hängend darzustellen versuchen, so erhält das Rekonstruktionsbild einen unwahrscheinlichen und unnatürlichen Charakter. Wenn wir dagegen einen Rhamphorhynchus in derselben Stellung wie einen auf dem Strande liegenden Rhynchops rekonstruieren, so gewinnt das Bild einen durchaus möglichen und wahrscheinlichen Eindruck. Kann sich der Mauersegler und der Scherenschnabel auch vom flachen Boden aus erheben und nach einem oder wenigen starken Flügelschlägen auf den Boden in die Luft schwingen, so ist dies wohl auch bei Rhamphorhynchus möglich gewesen. Hier kam aber noch der lange, in ein rhombisches Hautsegel endende, von starken

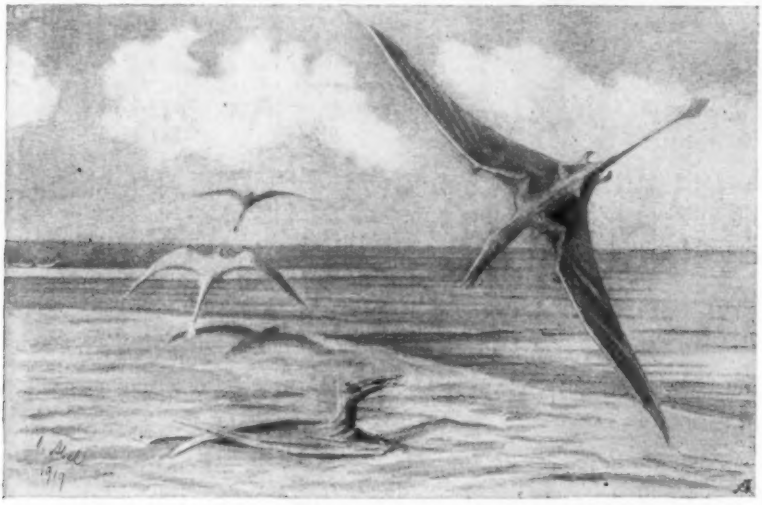

Fig. 7. Rekonstruktion von Rhamphorhynchus Gemmingi (Originalzeichnung).

Sehnen straff gespannte Schwanz beim Auffliegen zu Hilfe; durch das Aufschlagen des Schwanzes auf den Boden mußte der Sprung in die Luft auf das wirksamste verstärkt werden. Es ist sogar anzunehmen, daß sich Rhamphorhynchus nur gelegentlich mit Hilfe seiner Fingerkrallen an einen Ast oder Felsen anhakte und daß seine normale Ruhestellung dieselbe war, die wir beim Scherenschnabel beobachten können. Im Gegensatze zu Pterodactylus bestand also die Ruhestellung bei Rhamphorhynchus nicht im *Aufhängen*, sondern im *Liegen*. Ich habe diese verschiedenen Stellungen, also die liegende Ruhestellung, das Auffliegen und das ruhige Schweben und Gleiten in der neuen Rekonstruktion von Rhamphorhynchus (Fig. 7) zum Ausdrucke zu bringen versucht.

Diese kleinen Verbesserungen und Berichtigungen unserer Vorstellungen vom Lebensbilde der Flugsaurier zeigen, daß wir bestrebt sein müssen, immer wieder die Rekonstruktionen der fossilen Tiere zu überprüfen und daß wir uns nicht mit einer Rekonstruktion bescheiden dürfen, die für eine bestimmte Stellung und Bewegung ein halbwegs befriedigendes Bild gibt. Wenn auch unsere Vorstellungen von dem Aussehen und der Lebensweise dieser merkwürdigen Flugreptilien aus dem Mittelalter der Erdgeschichte seit den ersten Rekonstruktionsversuchen aus der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts wesentlich berichtigt worden sind und sich unsere Kenntnis von der Lebensweise der fossilen Flugreptilien bedeutend vertieft und erweitert hat, so bleiben doch noch immer einzelne Probleme in der Rekonstruktion dieser Tiere übrig, die zur Fortsetzung der paläobiologischen Untersuchungen über diese Formen anspornen. Dazu gehört z. B. die noch ungelöste Frage der Haltung des Halses und Kopfes und die Stellung der Körperachse zur Horizontalebene während des Schwebefluges von Rhamphorhynchus, Fragen, die auch vom Standpunkte der Aviatik Interesse beanspruchen, wie denn überhaupt Rhamphorhynchus mehr als irgendein anderes lebendes oder fossiles Flugtier dem mechanischen Prinzipe unserer Eindeckerflugmaschinen in geradezu überraschender Weise zu entsprechen scheint.

Mineralogie im Dienste der Geologie.

Von Prof. Dr. A. Johnsen, Kiel.

Einleitung.

Die verschiedenen Wissenschaften stehen vielfach in derartiger Beziehung zueinander, daß eine von ihnen das Fundament einer andern bildet. So darf wohl Altphilologie als eine Stütze der Historie betrachtet werden. Zuweilen kann man eine ganze Säule von Disziplinen aufbauen, deren jede der Grundstein einer anderen ist. Beispielsweise bildet Mathematik eine Grundlage der Physik, diese ein Fundament der Mineralogie, letztere eine Stütze der Geologie und diese wiederum eine Hilfswissenschaft der Geographie.

Im folgenden soll sich uns Mineralogie im Dienste der Geologie zeigen. Einen allgemeineren Überblick über die Beziehungen zwischen diesen beiden Forschungszweigen wird das Schlußkapitel bringen.

I.

Tiefenbestimmung.

Bereits im Jahre 1822 hat *H. Davy* Flüssigkeits- oder Mutterlaugeneinschlüsse in Bergkristallen, nachdem er diese unter einer Sperrflüssigkeit aufgebrochen hatte, chemisch analysiert. Kurz darauf (1826) erkannte *D. Brewster* flüssige Inklusionen der bläulichen Topase vom Rio Belmonte in Brasilien an ihrer thermischen Ausdehnung, die etwa 80-mal so groß als diejenige des flüssigen Wassers bei Zimmertemperatur war, als kondensierten Dampf und fand dessen Brechungsindex gleich 1,131 für die gelben Strahlen des Natriumlichtes. Nachdem auch *William Nicol*, der Erfinder des nach ihm benannten Kalkspatprismas, im Jahre 1828 Flüssigkeitseinschlüsse von Mineralien untersucht und *H. Cl. Sorby*, der Vater der mineralogischen Mikroskopie, die Brewsterschen Beobachtungen bestätigt hatte, erkannte *R. Th. Simmler* (1858) die Identität der Daten *Brewsters* mit den inzwischen von *Thilorier* (1835) festgestellten Konstanten der flüssigen Kohlensäure (CO_2). Endlich wiesen *H. Vogelsang* und *H. Geißler* (1869) chemisch mittels Kalkwassers sowie spektralanalytisch die Brewsterschen Topaseinschlüsse als CO_2 nach. Auch in Bergkristallen der Klüfte kristalliner Schiefer sowie in Quarzen der Granite und Gneise hat man flüssige und dampfförmige CO_2 nebeneinander aufgefunden. Da die kritische Temperatur der Kohlensäure + 31,3 ° C beträgt, so muß oberhalb dieser Temperatur der breite dunkle, durch Totalreflexion verursachte Streifen zwischen Flüssigkeit und Dampfblase verschwunden sein, was auch in der Tat von *A. Bryson* (1861) und von *H. Vogelsang* konstatiert wurde.

Sehr schön lassen sich diese Erscheinungen an Amethysten, also violetten Quarzen, studieren, die bei dem Dorfe Lipowaja unweit Mursinka im Bezirk Jekaterinburg in Quarzadern, d. h. in quarzerfüllten Gesteinsklüften auftreten und 1882 von *A. Karpinsky* beschrieben wurden. Unsere Fig. 1 zeigt einen solchen Amethystkristall mit einem Hohlraum, der die Form des „Wirtes", also des Amethystes, besitzt und von flüssiger CO_2 nebst darauf schwimmender CO_2-Libelle erfüllt ist. Jene Amethystadern sind einst, lange Zeit nach ihrer Entstehung, durch gebirgsbildende („orogenetische") Erdrindenbewegungen und Hebungen nebst darauffolgender Abtragung der Höhen („Denudation") zutage gefördert.

Fragt der Geologe nach der Erdtiefe, in der sich diese Amethystgänge einst bildeten, so kann der Mineraloge diese Frage beantworten, indem er die Einschlüsse in der beschriebenen Weise als

flüssige und dampfförmige CO_2 nachweist und folgende Überlegungen anstellt.

In etwa 10 m Tiefe unter irgendeinem Orte der Erdoberfläche herrscht die mittlere Jahrestemperatur (Lufttemperatur) des betr. Ortes, und von dieser Tiefe an nimmt die Temperatur für je 30 m Tiefenzunahme um etwa 1° C zu, was erfahrungsgemäß bis zu Tiefen von über 2 km gilt. Man bezeichnet daher die Länge von 30 m als mittlere *„geotherme Tiefenstufe"*. Setzt man das spezifische Gewicht der Gesteine in der Erdrinde gleich rund 2,6, so übt eine Gesteinssäule von 4 m Länge einen Druck von 1 Atmosphäre aus; demnach kann man die Länge von 4 m als mittlere *„geobare Tiefenstufe"* bezeichnen, deren Wert bis zu mehreren Kilometern sehr annähernd konstant bleibt.

Nun teile ich die sich unter der Erdoberfläche abspielenden Vorgänge in **„bathogene"**[1]) und **„plutogene"**[2]), je nachdem sich Temperatur und Druck am Orte des Vorganges aus seiner Tiefe und jenen Tiefenstufen berechnen lassen oder nicht.

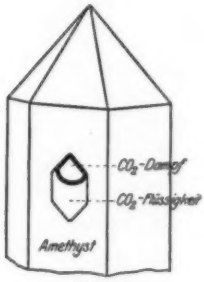

Fig. 1.

Wir wollen zunächst annehmen, daß unsere Amethystadern, deren Bildungsort nach seiner Tiefe den Geologen interessiert, durch einen annähernd *bathogenen* Prozeß entstanden. Wir untersuchen den Amethyst mittels Mikroskops bei etwa +20° C und finden, daß ungefähr 30% des Hohlraumes von dampfförmiger CO_2, die übrigen 70% von flüssiger CO_2 eingenommen werden. Die Dichte des Dampfes bei +20° sei mit ϱ_d bezeichnet, diejenige der Flüssigkeit mit ϱ_f und diejenige der Kohlensäure bei der Temperatur und dem Druck, die am Entstehungsorte gemäß seiner Tiefe herrschten, mit ϱ_t. Dann gilt offenbar die Gleichung

$$100\,\varrho_t = 30\,\varrho_d + 70\,\varrho_f,$$

deren linke Seite das Gewicht der eingeschlossenen CO_2 zur Zeit der Amethystbildung und deren rechte Seite die Summe der Gewichte der dampfförmigen und der flüssigen CO_2 zur Zeit unserer Untersuchung darstellt, wofern das Volumen des Hohlraumes in der Zwischenzeit sich nicht merklich geändert hat; das darf man in Anbetracht des sehr kleinen Ausdehnungskoeffizienten des Amethystes unbedenklich annehmen.

Die für +20° C geltenden Dichten ϱ_d und ϱ_f, die Dichte des Wassers bei +4° C gleich Eins gesetzt, können wir aus Tabelle A ablesen; danach ist $\varrho_d = 0{,}190$ und $\varrho_f = 0{,}766$. Somit liefert obige Gleichung $\varrho_t = 0{,}598$; das ist, wie aus der gleichen Tabelle zu ersehen, die Dichte der flüssigen CO_2 bei +30° C. Die Erdtiefe, in der diese Temperatur herrscht, ersehen wir aus Tabelle B als fast genau 1 km, wobei die einstige mittlere Jahrestemperatur von Mursinka gleich der heutigen, nämlich rund 0° C, angenommen ist. In jener Tiefe herrscht, wie die dritte Kolonne der Tabelle B zeigt, ein Druck von 252 Atmosphären, während nach Kolonne 4 der Druck des bei +30° gesättigten CO_2-Dampfes nur 72 Atmosphären beträgt; die CO_2 wurde somit im flüssigen Aggregatzustande eingeschlossen, was wir bereits aus der berechneten Dichte $\varrho_t = 0{,}598$ direkt gefolgert haben.

Tabelle A[1]).

Temperatur in Celsiusgraden	Dichte ϱ_d des gesättigten CO_2-Dampfes	Dichte ϱ_f der flüssigen CO_2
0	0,096	0,914
+ 5	0,114	0,888
+10	0,133	0,856
+15	0,158	0,814
+20	0,190	0,766
+25	0,240	0,703
+30	0,334	0,598
+31,3	0,464	0,464

Tabelle B[2]).

Erdtiefe ϑ in Metern	Temperatur t in Celsiusgraden in der Tiefe ϑ	Druck in Atmosphären in der Tiefe ϑ	Dampfdruck des bei der Temp. t gesättigten CO_2-Dampfes in Atmosphären
10	0	3,5	34,5
100	3	26	37,5
160	5	40	40
310	9	77,5	43.5
440	13	110	50
540	16	135	54
680	20	170	59
1010	30	252.5	72
1050	31,3	262,5	75
1340	40	335	—

Entsprechen diese aus der Annahme einer annähernd bathogenen Entstehungsweise des Ame-

[1]) Von τὸ βάθος = die Tiefe und γεννάω = ich bringe hervor; zu diesen Prozessen gehört die Regionalmetamorphose und die Entstehung der kristallinen Schiefer.

[2]) Von Pluto, dem Gott der Unterwelt; zu diesen Vorgängen gehört die Bildung der plutonischen oder Tiefengesteine sowie deren Kontaktmetamorphose.

[1]) Die Dichten ϱ_d und ϱ_f entsprechen den von *Amagat* 1892 angegebenen Werten.

[2]) Die Dampfdrucke entsprechen den von *Regnault* 1862 angegebenen Werten.

thystganges gezogenen Schlüsse den Tatsachen, so muß beim Erwärmen von + 20 ° auf + 30 ° die ganze CO_2-Libelle sich zu flüssiger CO_2 kondensieren. Der Versuch ergibt, daß in der Tat die CO_2-Flüssigkeit sich beim Erwärmen auf Kosten der Dampfblase ausdehnt und diese bei + 30 ° völlig verdrängt.

Nimmt man die einstige mittlere Jahrestemperatur von Mursinka höher als 0 ° an, so rückt die berechnete Bildungstiefe etwas in die Höhe; so erhält man z. B. aus einem Jahresmittel von + 10 ° eine Tiefe von 600 m statt 1000 m.

Hätte sich die Amethystbildung nicht bathogen, sondern plutogen vollzogen, etwa in 1 km Tiefe nicht bei der zugehörigen Tiefentemperatur von + 30 °, sondern bei + 40 °, so würde CO_2 im überkritischen Zustande mit einem spezifischen Gewichte von weniger als $\varrho_r = 0{,}5$ eingeschlossen worden sein und bei + 20 ° mehr als 45 Volumprozente Dampf nebst 55 Volumprozenten Flüssigkeit liefern, was mit unserer obigen Beobachtung eines Volumverhältnisses von 30 : 70 allzuschlecht übereinstimmt.

II.

Altersbestimmung.

Die Sedimentgesteine, welche bei normaler Lagerung als konzentrische Schalenstücke den Erdkern umhüllen, werden von dem Geologen nach dem *relativen* Alter ihrer Ablagerungszeit in Formationen eingeteilt, deren jeder eine geologische Periode entspricht. Von zwei übereinander liegenden Gesteinsschichten pflegt die obere („hangende") die jüngere, die untere („liegende") die ältere zu sein. Durch die paläontologische Untersuchung der Arten versteinerter Tiere und Pflanzen läßt sich das *relative* Alter (d. h. *das Vorzeichen der Altersdifferenz*!) der sie bergenden Sedimente kontrollieren. In diese Ablagerungen sind oft pilzförmig, gangförmig oder deckenförmig Eruptivgesteine eingeschaltet; ein solches Eruptivgestein ist jünger oder älter als das umgebende Schichtgestein, je nachdem dieses durch die von der erstarrenden Eruptivmasse ausgehenden Dämpfe und Wärmemengen verändert („kontaktmetamorphosiert") ist oder nicht.

Die Namen der einzelnen Perioden und ihrer Formationen sind nach zunehmendem Alter folgende: *Quartär, Tertiär, Kreide, Jura, Trias, Perm, Karbon, Devon, Silur, Kambrium, Präkambrium* und *Archaïkum*. Die Frage nach dem *absoluten* Alter dieser verschiedenen Zeiten und ihrer Gesteine stellt eines der größten geologischen Probleme dar. Der Mineraloge vermag diese Frage seit einigen Jahren bis zu einem gewissen Grade zu beantworten.

Die Gesteine und auch der durch Verwitterung aus ihnen hervorgegangene Erdboden sowie die heißen Quellwässer und die Atmosphäre besitzen sämtlich eine merkliche Radioaktivität. Diese rührt von solchen Mineralien her, die ein radioaktives Element der Uranreihe oder der Thoriumreihe enthalten, während die Aktivität von Kalium und Rubidium viel schwächer (und der Charakter des Aktiniums noch nicht genügend geklärt) ist. Manche Elemente solcher Zerfallsreihen senden α-Strahlen, d. h. doppelt positiv elektrisch geladene Heliumatome aus. Daher muß sich in solchen Mineralien eine Heliummenge finden, die im allgemeinen um so größer ist, je älter das Mineral. Kennen wir durch chemische Analyse den Prozentgehalt eines Minerales an Uran (U) oder an Thorium (Th) sowie an Helium (He) und anderseits die He-Menge, die aus einem Gramm U oder Th pro Jahr entsteht, so läßt sich das Alter des betr. Mineralindividuums berechnen.

Zur Berechnung der He-Menge, die beispielsweise aus einem Gramm U pro Jahr hervorgeht, ist nicht nur die Zerfallsgeschwindigkeit des gewöhnlichen Urans selbst, sondern auch diejenige aller seiner sieben mit α-Strahlung ausgestatteten Zerfallsprodukte zu berücksichtigen. Hierbei sind diejenigen Mengen dieser Zerfallsprodukte in Rechnung zu stellen, die mit 1 g U im Gleichgewicht sind. Es gehen unter Aussendung von einem α-Teilchen (He-Atom) pro Atom der Reihe nach ineinander über U I, U II, Ionium, Ra, Ra-Emanation, RaA, RaC und RaF, während dieses Radium-F nach einer sehr wahrscheinlichen Hypothese von *B. B. Boltwood* (1907) in das inaktive Blei (Pb) sich umwandelt; dieses hat in der Tat entsprechend dem Gewicht eines He-Atoms ein um annähernd 4 Einheiten niedrigeres Atomgewicht (207) als das RaF (210,5). Während jener Umwandlungen nimmt also die Menge des U I ab und die Menge des Pb zu. Die Halbwertszeit, d. h. die Zeit, in der sich die Hälfte der vorhandenen Masse zersetzt, ist nun aber für U I viel größer als für seine sämtlichen sieben obigen Zerfallsprodukte; *aus diesem Grunde* kann die Ausgangsmenge von 1 g U I für lange Zeit als praktisch konstant angenommen werden und somit ergeben sich bestimmte Massengleichgewichte zwischen den 8 genannten je 1 He-Atom liefernden Elementen der Uranreihe.

Die folgende Tabelle C enthält die mit 1 g U I im Gleichgewicht befindlichen Massen m, in Grammen ausgedrückt, die Atomgewichte A sowie die Halbwertszeiten z, die offenbar den Atommengen $\frac{m}{A}$ proportional sein müssen, so daß

$$\frac{m_1}{A_1 z_1} = \frac{m_2}{A_2 z_2} = \ldots = \frac{m_8}{A_8 z_8} \ldots\ldots \quad (0)$$

konstant ist.

Alle acht radioaktiven Elemente der Tabelle C erzeugen, im gegenseitigen Gleichgewicht befindlich, pro Zeiteinheit eine und dieselbe He-Menge, da diese den Werten $\frac{m}{Az}$ proportional ist. Wir wollen diesen Heliumbetrag z. B. aus der mit 1 g U I im Gleichgewicht befindlichen Radiummenge $m = 0{,}34 \times 10^{-6}$ g berechnen. Die Umwandlungsgeschwindigkeit v dieser Radiummasse ist trotz deren andauernden Zerfalles konstant, da die

Tabelle C[1]).

Name des chem. Elementes	Masse m in Grammen, im Gleichgewicht mit 1 g U I	Halbwertszeit z	Atomgewicht A
Uran I.....	1	5×10^9 Jahre	238,5
Uran II.....	196×10^{-6}	10^6 Jahre	234,5
Ionium.....	39×10^{-6}	2×10^5 Jahre	230,5
Radium	$0{,}34\times10^{-6}$	2×10^3 Jahre	226,5
Ra-Emanation..	$1{,}94\times10^{-12}$	3,85 Tage	222,5
Radium A	$1{,}05\times10^{-15}$	3,0 Minuten	218,5
Radium C	$6{,}8\times10^{-15}$	19,5 Minuten	214,5
Radium F	65×10^{-12}	136 Tage	210,5
Blei.....	—	—	207

Masse m durch das ebenfalls zerfallende Ionium immer wieder ergänzt wird. Nun ist v proportional der sich umwandelnden Masse m, also

$$v = k \cdot m, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

worin die Umwandlungskonstante k offenbar die Umwandlungsgeschwindigkeit der Masseneinheit ist. Für jede radioaktive Substanz ist

$$k = \frac{\ln 2}{z}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

wenn ln den *natürlichen* Logarithmus und z die Halbwertszeit bedeutet. Da nach Tabelle C für Radium $z = 2000$ Jahre ist, liefert uns (2) $k = 0{,}347\times10^{-3}$. Somit folgt $v = k\,.\,m = 1{,}18\,.\,10^{-10}$. Weil nun v die in der Zeiteinheit zerfallende Ra-Menge bedeutet und wir z in Jahren, m in Grammen gemessen haben, so ist $v = 1{,}18\times10^{-10}$ die Anzahl der im Jahre zerfallenden Gramme Radium. Nach Tab. C ist das Atomgewicht des Ra gleich 226,5, das des He gleich 4; das Gewicht von 1 cm³ He beträgt bei 0° C und gewöhnlichem Luftdruck 0,000 177 Gramm, d. i. die Dampfdichte; somit ergibt sich

$$\frac{4\times1{,}18\times10^{-10}}{226{,}5\times0{,}000177} = 1{,}18\times10^{-6}\ \text{cm}^3$$

oder $= 1{,}18\times10^{-5}\ \text{mm}^3$

als die pro Jahr aus $0{,}34\times10^{-6}$ g Ra hervorgehende He-Menge. Jedes der acht α-strahlenden, d. h. He-liefernden Elemente der Uranreihe erzeugt, wenn sie alle mit 1 g Uran I im Gleichgewichte sind, die gleiche He-Menge. Folglich liefert 1 g U I samt seinen Umwandlungsprodukten pro Jahr $8\times1{,}18\times10^{-5} = 9{,}5\times10^{-5}$ mm³ Helium. Diese von uns gefundene Zahl stimmt genügend mit dem Werte 11×10^{-5} mm³ überein, den *E. Rutherford* und *H. Geiger* mittels der sogenannten Szintillationsmethode[2]) erhielten.

Ergibt nun die chemische Analyse von 1 g eines Th-freien Minerales M Gramm Uran und V Kubikmillimeter Helium, so beträgt das Alter Z des Minerales in Jahren offenbar

$$Z = \frac{V}{11\times10^{-5}M} \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

So fand *R. J. Strutt*, der sich seit 1905 mit derartigen Ermittelungen befaßt hat, in Thoriumfreiem Zirkon tertiärer Gesteine von Expailly in der Auvergne pro 1 g dieses Minerales einen Urangehalt von $3{,}15\times10^{-4}$ g und einen He-Gehalt von 212×10^{-9} mm³. Sonach ergibt (3) für diese Gesteine ein Alter von 6 Millionen Jahren.

Bedenkt man, daß trotz der mechanischen und chemischen Widerstandsfähigkeit des Zirkons, dessen Zusammensetzung, von dem geringen Urangehalt abgesehen, der Formel $ZrSiO_4$ entspricht, ein Teil des gebildeten He-Gases im Verlaufe von Jahrmillionen aus dem Mineralkorn entwichen sein mag, so wird das soeben berechnete Gesteinsalter geringer als das wahre sein. Man kann aber statt dieser unteren Altersgrenze auch eine obere ermitteln. Da nämlich das Endprodukt des Zerfalls der Uranreihe, wie erwähnt, höchstwahrscheinlich Blei ist, so kann man aus dem Bleigehalt von Uranmineralien ebenfalls deren Alter berechnen. Da 1 g Uran pro Jahr 11×10^{-5} mm³ $\mathrm{He} = 1{,}95\times10^{-11}$ g He liefert und gleichzeitig mit acht He-Atomen immer ein Bleiatom entsteht und das Atomgewicht von Blei gleich 207, das von He gleich 4 ist, so liefert 1 g Uran in 1 Jahr $\frac{207\times1{,}95\times10^{-11}}{8\times4} = 12{,}6\times10^{-11}$ g Blei. Enthält also 1 g eines Minerales M_1 Gramm Uran und M_2 Gramm Blei, so beträgt sein Alter Z in Jahren

$$Z = \frac{M_2}{12{,}6\times10^{-11}M_1}. \quad \ldots\ldots \quad (4)$$

Nun fand *A. Holmes* (1911) z. B. für den präkambrischen Thorianit von Ceylon, ein Uran und Thorium führendes Mineral, den Quotienten $\frac{M_2}{M_1} = 0{,}20$, woraus sich nach (4) das Alter der präkambrischen Ceylongesteine, aus denen der Thorianit herausgewittert ist, gleich 1600 Millionen Jahre ergibt. Diese Berechnungsweise ist im Gegensatz zu den auf dem He-Gehalt beruhenden Berechnungen unabhängig von einem Thoriumgehalt der betr. Mineralien, da Thorium im Gegensatz zum Uran zwar He, nicht aber Blei erzeugt.

Da nun der Thorianit möglicherweise schon bei seiner Entstehung etwas Blei von außen her in sich aufgenommen haben kann, d. h. nicht sein ganzer heutiger Bleigehalt im Minerale selbst entstanden zu sein braucht, so liefert die Formel (4) statt des Minimalalters der Formel (3) vielmehr ein Maximalalter. In der Tat wurde der He-Gehalt Pb-führender Uranmineralien stets niedriger gefunden als dem Verhältnis $\frac{8\times4}{207}$ (s. oben) entspricht.

Wie uranhaltige Mineralien, so kann man

[1]) Diese Tabelle ist berechnet aus Werten, die dem Buche von *E. Rutherford*, „Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen" (*E. Marx*, Handb. d. Radiologie II, S. 416 u. 463, Leipzig 1913) entnommen sind.

[2]) Läßt man die α-Teilchen (geladene He-Atome) einen Schirm von Zinksulfid bombardieren, so erzeugt jedes Atom einen phosphoreszierenden Fleck; die Zahl dieser Flecke ist also gleich der Anzahl der He-Atome, woraus man die gesamte He-Masse berechnet, da ein Atom He eine Masse von $4\times1{,}64\times10^{-24}$ Gramm hat.

auch *thoriumführende* auf ihren He-Gehalt hin analysieren und darauf eine Altersberechnung gründen.

III.

Temperaturbestimmung.

Die einen Hohlraum der Erdrinde ausfüllenden Stöcke oder Massive von Graniten, die aus der Erstarrung eines Magmas, also eines natürlichen Schmelzflusses, in der Tiefe hervorgehen, zeigen häufig Apophysen. Das sind Gänge oder Ausfüllungen von Spalten in dem granitischen Tiefengestein selbst oder in seinem Nebengestein; diese Spalten öffneten sich teils während der Intrusion und Erstarrung des Hauptmagmas, teils infolge gebirgsbildender Bewegungen zu andern Zeiten; die noch nicht verfestigten Rückstände des Magmas drangen in die Spalten ein und kristallisierten dort aus. Da das Granitmagma im wesentlichen aus Silikaten nebst überschüssiger Kieselsäure und Wasser besteht und das Wasser während der Abkühlung des Magmas nicht mit auskristallisiert, so werden die noch nicht verfestigten Schmelzreste mit der Zeit, also mit abnehmender Temperatur, immer wasserreicher derart, daß das Wasser schließlich über die „trockenen" Magmakomponenten überwiegt und man von einer heißen wässerigen Lösung sprechen darf.

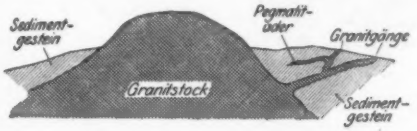

Fig. 2.

Diese wässerigen Lösungen, deren Temperatur infolge des erheblichen Außendruckes mehrere hundert Celsiusgrade betragen kann, sind naturgemäß viel dünnflüssiger und beweglicher als das ursprüngliche Magma und dringen in die äußersten Spaltenausläufer und ihre kapillaren Verästelungen ein (Fig. 2), wo sie teils infolge fortschreitender Abkühlung, teils infolge von Verdampfung des lösenden Wassers die gelösten Bestandteile, hauptsächlich Kristalle von Quarz und Kalifeldspat ausfallen lassen, während die dunklen Glimmertafeln sich bereits in den älteren Gängen und dem noch älteren Granitstock ausgeschieden haben. Jenes Kristallgemenge von Quarz und Feldspat der jüngeren Gänge und Adern bezeichnet man als Pegmatit, zuweilen auch wegen eines an Keilinschriften erinnernden Gefüges als Schriftgranit.

Die Bildungsbedingungen des Granitstockes, der Granitgänge und der Pegmatitgänge, z. B. auch ihre *Ausscheidungstemperaturen* sind offenbar von geologischem Interesse, und der Mineraloge vermag in der Tat gewisse obere und untere Temperaturgrenzen auf folgende Weise zu ermitteln.

Das Mineral Quarz (SiO_2) geht nach *H. Le Chatelier* (1889 und 1890) bei annähernd + 570 ° C unter plötzlicher stärkerer Ausdehnung und unter unstetigem Anwachsen seines optischen Drehungsvermögens in einen neuen kristallisierten Aggregatzustand über, der sich von dem der gewöhnlichen Quarzkristalle nicht chemisch, sondern nur in der Anordnung und den Schwingungen der Atome unterscheidet; man nennt diese künstlich erzeugte Quarzart „β-Quarz", den gewöhnlichen Quarz der Granite und Pegmatite dagegen „α-Quarz". Jene Umwandlung[1]) ist reversibel, d. h. beim Sinken der Temperatur unter den genannten Wert geht der β-Quarz wieder in α-Quarz über, indem oberhalb dieser Umwandlungstemperatur die β-Art, unterhalb die α-Art stabil ist. Die Umwandlung von α-Quarz in β-Quarz ist nach *H. Le Chatelier* und *E. Mallard* (1890) auch von einer plötzlichen Abnahme der Doppelbrechung und nach *F. Rinne* und *R. Kolb* (1910) von einer unstetigen Erniedrigung der beiden Hauptbrechungsindizes im gelben Natriumlicht sowie von einer diskontinuierlichen Ab-

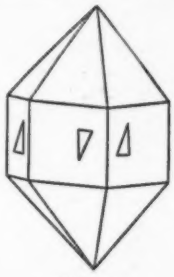

Fig. 3.

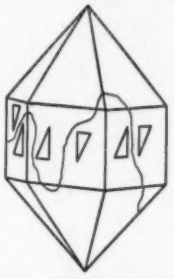

Fig. 4.

nahme des sogenannten Rhomboederwinkels von 85 ° 32′ auf 85 ° 28′ und nach *F. E. Wright* und *E. Larsen* (1909) von einer Wärmeentwicklung von etwa 4 Grammkalorien pro 1 g Quarz begleitet; die beiden letztgenannten Forscher ermittelten die Umwandlungstemperatur zu + 575 ° ± 2 ° C.

Ätzt man einen rechtsdrehenden oder einen linksdrehenden (Fig. 3) α-Quarzkristall bei Zimmertemperatur mit Flußsäure (HF), so frißt sie sich in die 6 Säulenflächen des Kristalles derart ein, daß regelmäßig begrenzte Vertiefungen, sogenannte „Ätzgrübchen", entstehen; dabei bildet sich auf jeder der 6 Säulenflächen nicht nur *ein* Ätzgrübchen, wie in Fig. 3 gezeichnet, sondern eine größere Anzahl. Die in einer und derselben Säulenfläche liegenden Grübchen sind entweder sämtlich einander kongruent und parallel (Fig. 3) oder sie sind zwar alle einander kongruent, befinden sich aber in zwei verschiedenen (um 180 ° gegeneinander gedrehten) Stellungen (Fig. 4). Im ersteren Falle liegt ein einziges

[1]) Vergl. diese Zeitschrift 1918, S. 530.

einheitliches Quarzindividuum vor, im letzteren Falle ein sogenannter „Zwilling" zweier Quarzkristalle, die in gesetzmäßiger Weise zueinander orientiert sind. Als nun *O. Mügge* (1907) *solche* α-Quarze, die sich bei derartigen Ätzversuchen als einheitlich, also *nicht* verzwillingt erwiesen, durch Erhitzen auf über + 575 ° in β-Quarze umwandelte und diese durch Abkühlen auf Zimmertemperatur wieder in α-Quarze überführte, ergab sich bei nunmehrigem nochmaligen Ätzen mit HF das Bild der Fig. 4 statt desjenigen der Fig. 3. Durch jene Prozedur war also jeder ursprünglich einfache Kristall in einen Zwilling übergegangen. Daraus folgt, daß diejenigen α-Quarze, die in der Natur aus β-Quarzen hervorgegangen sind, diese ihre Vergangenheit oder Vorgeschichte dadurch verraten müssen, daß sie sich beim Ätzen als Zwillinge erweisen. Durch Ätzen der Quarze eines Granitstockes oder eines Pegmatitganges kann man also ermitteln, ob deren α-Quarze sich einst als solche oder ursprünglich als β-Quarze aus dem Magma ausgeschieden haben, d. h. ob die Ausscheidungstemperatur unterhalb oder oberhalb + 575 ° C lag.

Der Quarz spielt demnach die Rolle eines *natürlichen geologischen Thermometers.*

Unter diesem Gesichtspunkt unternahmen *F. E. Wright* und *E. Larsen* (1909) Ätzversuche an Quarzen, die aus Granitstöcken, Granitgängen, Pegmatitadern und -drusen (Geoden) sowie aus Erzadern stammten. Diese Versuche ergaben, daß die Quarze der Granitstöcke und Granitgänge oberhalb + 575 °, diejenigen der Pegmatite und ihrer Drusen unterhalb dieser Temperatur ausgeschieden worden sind. Somit erhält man für die Bildung der Granite eine untere, für die der Pegmatite eine obere Temperaturgrenze, nämlich beide Male + 575 °. Daß in der Tat die Genese der Pegmatite aus den wasserreichen Magmaresten bei tieferen Temperaturen vor sich ging als die vorherige Bildung des Granitmassives, war bereits aus der Einleitung dieses Kapitels zu ersehen.

Zum Schluß sei noch kurz auf die Frage eingegangen, ob nicht der mehr oder weniger hohe in der Tiefe herrschende Druck die für gewöhnlichen Atmosphärendruck ermittelte Umwandlungstemperatur $t_u = + 575$ ° erheblich verschiebt. Diese Frage wird beantwortet durch Anwendung der Clausius-Clapeyronschen Formel

$$\frac{\mathrm{d}\,T_u}{\mathrm{d}\,p} = \frac{T_u\,(v_\beta - v_\alpha)}{r} \quad \ldots\ldots\ (1)$$

Hiernach ist die mit einer Drucksteigerung von $\mathrm{d}\,p$ Dynen/cm² verbundene Erhöhung $\mathrm{d}\,T_u$ der Umwandlungstemperatur gleich dem Produkt aus der absoluten Umwandlungstemperatur T_u (bei gewöhnlichem Luftdruck, also 575 ° + 273 °) und der Differenz der spezifischen Volumina v_β und v_α von β-Quarz und α-Quarz, dividiert durch die in Erg ausgedrückte Wärmeabsorption beim Übergang von α-Quarz in β-Quarz.

Man berechnet durch Einsetzen der betreffenden Werte in (1), daß selbst ein Druck von 1000 Atmosphären die Größe T_u nur um etwa + 15 ° erhöht.

(Schluß folgt.)

Die Grundlagen der Erregung und der Erregungsleitung in der lebendigen Substanz.

Von Priv.-Doz. Dr. Walter Thörner, Bonn.

II.

Die Untersuchung der *Erregbarkeitsverhältnisse während des Ablaufs einer Erregung* hat viele allgemein-physiologisch wichtige Vorgänge aufgeklärt. Trifft ein neuer Reiz ein lebendiges System zu einer Zeit, da soeben auf einen ersten Reiz hin alle zerfallsfähigen Moleküle zerfallen sind, während ein wesentlicher Neuaufbau noch nicht stattgefunden hat, so kann er nichts zum Zerfall bringen und muß also wirkungslos bleiben, so stark er auch sein mag. In dieser Zeit, die etwa der Dauer der Dissimilationsphase entspricht, ist jede Form lebendiger Substanz völlig unerregbar für jeden beliebigen Reiz. Man nennt diese Zeit das *absolute Refraktärstadium,* gemäß der von *Marey* entdeckten „phase refractaire" des Herzmuskels. Es ist sehr kurz und beträgt z. B. beim Nerven des Frosches nur 0,001 Sekunden, beim Skelettmuskel etwa 0,005 Sekunden, bei der Ganglienzelle aber schon 0,1 Sekunde. Erfolgt dagegen der neue Reiz etwas später, in einem Zeitpunkt, wenn schon durch die assimilatorischen Vorgänge eine gewisse Menge neuer zerfallsfähiger Substanz wiederhergestellt ist, so kann er diese zum Zerfall bringen, falls er stark genug ist, die Schwelle der noch herabgesetzten Erregbarkeit zu überwinden. Dieses Stadium, in welchem eine unvollkommene Erregbarkeit wieder vorhanden ist und in welchem starke Reize eine stärkere Erregung auslösen als schwache, bezeichnet man eben mit Relation auf die Reizstärke als *relatives Refraktärstadium.* Es ist im wesentlichen auf die Zeit des Überwiegens der assimilatorischen Vorgänge beschränkt und endet erst mit der völligen Restitution. Das gesamte Refraktärstadium, absolutes und relatives zusammengenommen, entspricht wiederum der Dauer der Erregung. Das Refraktärstadium ist zuerst am Herzmuskel beobachtet worden, der während der Kontraktionsphase unerregbar ist für jeden neuen Reiz. Eine Errungenschaft der letzten Jahre ist jedoch die Erkenntnis, daß das Refraktärstadium eine notwendige Eigenschaft aller lebendigen Substanz ist, daß es eben nichts anderes darstellt als einen besonderen Ausdruck des Erregungsstoffwechsels, bei dessen zeitlicher Betrachtung, und daß es für die Erklärung aller Reizvorgänge von fundamentaler Bedeutung ist.

Die *Dauer des Refraktärstadiums* unterliegt

allen den Einflüssen, die die Ablaufsgeschwindigkeit des Erregungsstoffwechsels bestimmen, und zwar vor allem der Assimilationsphase, da das dieser entsprechende relative Refraktärstadium den bei weitem größeren Anteil am Gesamtrefraktärstadium hat. Daher besteht eine direkte Abhängigkeit von der Art und dem Zustand der lebendigen Substanz. Verschiedene lebendige Systeme haben sehr verschieden lange Refraktärstadien. Von großem Einfluß sind ferner äußere Faktoren, vor allem *Temperatur* und *Sauerstoff*. Abkühlung bewirkt eine Verlängerung, Erwärmung eine Verkürzung des Refraktärstadiums. Das ist ohne weiteres verständlich, da ja die zugrunde liegenden chemischen Umsetzungen ihre Geschwindigkeit mit der Temperatur im Sinne der Regel *van't Hoffs* ändern.

Der *Einfluß des Sauerstoffs* auf das Refraktärstadium ist natürlich auf die aëroben Organismen beschränkt, aber hier von um so größerer Bedeutung, als auf den Eintritt von *Sauerstoffmangel* eine Reihe wichtiger physiologischer Vorgänge zurückzuführen sind. Daß der Erregungsstoffwechsel der Aërobier gerade auf einer Steigerung der oxydativen Prozesse in der lebendigen Substanz beruht und daß daher die Anwesenheit einer genügenden Menge Sauerstoff nicht nur zur Erhaltung des Lebens überhaupt, sondern speziell zur Ermöglichung von Erregungen erforderlich ist, hörten wir schon. Bringen wir z. B. eine gewisse Strecke eines Froschnerven in ein indifferentes sauerstofffreies Medium, so sehen wir die Erregbarkeit derselben nach Maßgabe des Verbrauches des noch im Gewebe enthaltenen Sauerstoffs allmählich sinken und schließlich erlöschen, um aber bei Sauerstoffzufuhr schnell zurückzukehren. Es braucht also der Sauerstoffmangel kein absoluter zu sein, um zu einer Herabsetzung der Erregbarkeit zu führen. Diese nimmt vielmehr sogleich ab, sobald die vorhandene Sauerstoffmenge für den augenblicklichen Bedarf nicht mehr ausreicht. Es handelt sich auch bei den zu besprechenden Erscheinungen um einen *relativen Sauerstoffmangel*. Der Einfluß desselben macht sich zuerst auf die Erholungsphase des Erregungsstoffwechsels geltend, die Assimilation wird mehr und mehr verlangsamt und schließlich unvollkommen; zeitlich betrachtet, das *relative Refraktärstadium wird verlängert*.

Wir können uns das Zustandekommen dieser Erscheinungen etwa folgendermaßen erklären: Je geringer der Sauerstoffpartialdruck ist, um so langsamer kann er einerseits zu den Orten des Verbrauchs hinzudiffundieren, so daß seine Einfügung beim Aufbau neuer Moleküle Not leidet, und der die Erregbarkeit bedingende hohe Labilitätsgrad um so später oder schließlich gar nicht mehr erreicht wird. Um so unvollkommener verläuft andererseits die Verbrennung selbst und die weitere Oxydation der Spaltungsprodukte, so daß sich diese in größeren Bruchstücken anhäufen, da für sie schlechtere Diffusionsbedingungen bestehen; und so den weiteren Ablauf des Stoffwechsels hemmen. Infolge ungenügenden Aufbaus und Ansammlung der Zerfallsprodukte muß auch der Zerfall selbst geringer werden. So sehen wir sekundär auch die Dissimilation beeinträchtigt werden, was zum Ausdruck kommt in der Abnahme der Energieproduktion, an der wir die Erregung erkennen. Räumlich betrachtet besteht also der Einfluß des Sauerstoffmangels in einer Herabsetzung der Größe, des Umfanges des Erregungsstoffwechsels und damit der Energieentfaltung, zeitlich betrachtet in einer Verringerung seiner Ablaufsgeschwindigkeit, in einer Dehnung des Refraktärstadiums, vor allem des relativen.

Auf einem sich entwickelnden relativen Sauerstoffmangel kann der *Umschlag einer anfänglich erregenden Reizwirkung in eine lähmende*, von dem wir oben sprachen, beruhen. Wenn ein Reiz länger einwirkt oder eine gewisse Intensität überschreitet, können die dissimilatorischen Vorgänge derart gesteigert sein, daß die in der Zeiteinheit mögliche Sauerstoffversorgung nicht mehr ausreicht, den erhöhten Verbrauch zu decken. In solchen Fällen läßt sich durch Erhöhung des Sauerstoffpartialdruckes, d. h. seiner Konzentration in dem umgebenden Medium, der Eintritt der Lähmung hinausschieben. Hierher gehören vor allem die Erscheinungen der Wärmelähmung und der Ermüdung.

Bei der *Wärmelähmung* stellt die mit der Temperatur steigende Stoffwechselgeschwindigkeit speziell der Verbrennungsvorgänge das Moment dar, das zu einem Unzureichendwerden der Sauerstoffversorgung führt. Die Höhe der Temperatur, bei welcher die Lähmung eintritt, liegt bei den meisten tierischen Organismen zwischen 30 und 40 ° C, zeigt jedoch sehr bedeutende Schwankungen über diese Grenzen hinaus, die von der spezifischen Grundgeschwindigkeit der Lebensprozesse der einzelnen Arten und ihrer Organe abhängen. Durch Abkühlung ist die Lähmung prompt zu beseitigen, falls nicht schon bleibende Zustandsänderungen bei den Kolloiden der lebendigen Substanz eingetreten sind, wie Gerinnung von Eiweißkörpern, die als Wärmestarre bezeichnet werden.

Die *Ermüdung* darf als allgemeinphysiologisch bedeutsame Erscheinung unter den Reizerfolgen eine eingehendere Erörterung beanspruchen. Auch sie stellt eine Lähmung dar, eine Arbeitslähmung. Sie *beruht auf der zunehmenden Verlängerung des relativen Refraktärstadiums infolge sich ausbildenden relativen Sauerstoffmangels* und kommt zum Ausdruck in der Abnahme der Arbeitsleistung, d. i. der Größe der Erregungen bei einem Organ, das durch andauernde Reizung in Tätigkeit gehalten wird.

Lassen wir erregende Reize in rhythmischer Folge auf ein lebendiges System einwirken, derart, daß die Reizzwischenräume etwas kleiner sind als das spezifische Gesamtrefraktärstadium des

betreffenden lebendigen Systems — am Froschnerven also z. B. 10 Reize pro Sekunde, am Muskel genügt schon eine geringere Reizfrequenz —, so fällt jeder folgende Reiz in das relative Refraktärstadium der voraufgehenden Erregung. Er kann also nur eine untermaximale Erregung auslösen, indem er nur die Menge zerfallsbereiter Substanz zur Zersetzung bringt, die bis dahin wieder aufgebaut war. Da er dadurch den Sauerstoffverbrauch steigert, ohne daß in den Reizpausen genügend Sauerstoff frisch hinzudiffundieren kann, verlängert er das Refraktärstadium. (Das geht daraus hervor, daß man durch Steigerung des Sauerstoffpartialdruckes die Ermüdbarkeit verringern kann; es wird dann eine größere Reizfrequenz zur Ermüdung erforderlich.) So werden aber die Refraktärstadien immer länger, als zeitlicher Ausdruck der Dehnung der Restitutionsprozesse. Die folgenden Reize finden immer weniger Substanz restituiert vor, und daher werden die von ihnen ausgelösten Erregungen immer kleiner, und damit auch die Energieproduktion, die Arbeitsleistung. Das nennen wir Ermüdung. Schließlich aber stellt sich in einer gewissen Ermüdungstiefe ein *Gleichgewichtszustand* ein, indem nun durch jeden Reiz gerade noch so viel zum Zerfall gebracht wird, wie in den Reizpausen wiederhergestellt werden kann, indem Dissimilation und Assimilation und Sauerstoffverbrauch und -zufuhr gleichen Schritt halten. In welcher Höhe dieses Gleichgewicht liegt, d. h. wie tief die Ermüdung getrieben werden kann, hängt neben der Eigenart des erregten Organes von der Intensität und Frequenz der Reizung, ferner vom Sauerstoffpartialdruck und von der Temperatur ab. Verstärkung der Reize, Sauerstoffentziehung und Herabsetzung der Temperatur drücken das Niveau des Gleichgewichtes herab, vertiefen die Ermüdung, indem sie das Refraktärstadium verlängern. Schnelle Reizfolge wirkt im selben Sinne. In all diesen Fällen treffen die folgenden Reize in tiefere Stadien der refraktären Phase, wo die Restitution weniger vorgeschritten ist.

Umgekehrt erzielen wir mit schwächeren Reizen, unter höherem Sauerstoffdruck oder bei höheren Temperaturen (unterhalb der Wärmelähmung) nur geringere Ermüdungstiefen, da die Erholung unter diesen Bedingungen schneller vollendet, das Refraktärstadium kürzer ist. So erweist sich z. B. der Nerv des Kalt- und Warmblüters bei Temperaturen über 34 ° C als kaum noch ermüdbar, da er an sich schon ein sehr kurzes Refraktärstadium besitzt.

Aus der Tatsache des Refraktärstadiums lassen sich auch die *Hemmungserscheinungen* erklären, die beim Antagonismus unserer Muskeltätigkeit und überhaupt für die Koordination der Erregungen im Zentralnervensystem eine wichtige Rolle spielen. Da wir wissen, daß die Ganglienzellen, die ein relativ langes Refraktärstadium besitzen, sich rhythmisch entladen, und daß die Muskelbewegungen normalerweise durch solche rhythmischen Impulse (beim Menschen 18—20 pro Sekunde) erzeugt werden, so können wir uns die Hemmungen erklären aus der Interferenz zweier Reizserien in einer gemeinsamen Strecke. Es werde z. B. eine motorische Ganglienzelle durch Reize von irgendeiner sensiblen Bahn her in rhythmische Erregung versetzt, so daß der zugehörige Muskel in tetanische Kontraktion gerät. Lassen wir nun von einer anderen Bahn her eine andere schwächere Reizserie auf dieselbe Ganglienzelle einwirken, so fallen diese neuen Reize in die Refraktärstadien der Erregungen der ersten Serie. Sie sind zu schwach wirksam, um eine am Muskel erkennbare Erregung auszulösen, verlängern aber das Refraktärstadium, indem sie die geringe Menge eben aufgebauter Substanz wieder zum Zerfall bringen. Daher fallen nun auch die Reize der ersten Serie in die verlängerten Refraktärstadien hinein, finden eine ungenügende Restitution vor und bleiben unwirksam oder rufen nur eine unterschwellige Erregung hervor. Der Muskel erhält keine Impulse mehr und erschlafft. Derartige Hemmungen kann man auf den Reflexbahnen des Rückenmarks leicht experimentell darstellen. Die Kenntnis der Eigenschaften des Refraktärstadiums hat weiterhin eine Menge physiologisch und pathologisch wichtiger Vorgänge, wie Bahnung, scheinbare Erregbarkeitssteigerung u. a. m., unserem Verständnis erschlossen. Eine weitere Besprechung würde über den Rahmen dieser Abhandlung hinausgehen, der es nur auf die Darlegung der Grundprinzipien des Erregungsvorgangs ankommt.

Nach dieser etwas eingehenderen Untersuchung des Ablaufs des Erregungsvorganges in der Zeit wollen wir uns nun kurz der Betrachtung desselben im Raume zuwenden, d. h. die Frage nach der *Größe der Erregung* erörtern. Die Größe einer Erregung wird bestimmt durch die Menge zerfallsbereiter Substanz, die durch einen Einzelreiz zum Zerfall gebracht wird, also durch den Umfang der dissimilatorischen Prozesse. Es bieten sich zwei Möglichkeiten, die wir beide im Erregungsstoffwechsel der Organismen verwirklicht finden.

Es gibt lebendige Systeme, in denen unter normalen Bedingungen durch jeden überhaupt nur wirksamen Reiz alles zerfällt, was zerfallen kann. Diese liefern demgemäß, wenn überhaupt etwas, so stets maximale Erregungen, auf starke wie auf schwache Reize. Man nennt sie daher *isobolisch* und sagt, sie folgen dem *„Alles-oder-Nichts-Gesetz"*. Hierher gehören der Nerv, der Herzmuskel und wahrscheinlich auch der Skelettmuskel. Da alle Organe aus einer großen Anzahl gleichartiger Einzelelemente, wie z. B. Nerv und Muskel aus Elementarfibrillen, aufgebaut sind, die nicht alle gleiche Erregbarkeit zu haben brauchen, ist Isobolie stets nur auf Umwegen nachzuweisen und gilt nur für die einzelnen Elementarbestand-

teile. Eine Ausnahme bildet der Herzmuskel, der ein Syncytium von Elementarfasern, gewissermaßen eine einzige große Muskelzelle mit vielen Kernen darstellt. Es ist daher nicht verwunderlich, daß an ihm die Gültigkeit des „Alles-oder-Nichts-Gesetzes" zuerst aufgefunden wurde. Im übrigen besteht die Möglichkeit, dieses Gesetz auch allgemeiner für Elementarteile solcher Organe anzunehmen, für die es bis jetzt nicht gilt.

Dem isobolischen Typus steht ein anderer gegenüber, den man den heterobolischen nennt. Ein Vertreter desselben ist z. B. die Ganglienzelle. In den *heterobolischen Systemen* richtet sich die Größe des Zerfalls nach der Stärke des Reizes, sie geben auf starke Reize große, auf schwache Reize kleine Erregungen. Es sind dies im allgemeinen die lebendigen Systeme, die von vornherein ein langes Refraktärstadium besitzen. Natürlich gelten die Begriffe der Isobolie und der Heterobolie nur für solche Formen lebendiger Substanz, die völlig ausgeruht und restlos restituiert sind. Im Refraktärstadium sind auch die vorerwähnten isobolischen Systeme heterobolisch, indem sie auf schwache Reize schwache, auf starke Reize starke Erregungen geben, die aber nie über die maximale Erregung des ausgeruhten Systems hinausgehen. Unter Einflüssen, die die Stoffumsatzgeschwindigkeiten verlangsamen und also das Refraktärstadium verlängern, wie z. B. Abkühlung, Erstickung, Ermüdung, Narkose, folgen auch die isobolischen Systeme dem „Alles-oder-Nichts-Gesetz" nicht mehr. Die Kenntnis der soeben besprochenen Verhältnisse, die neuesten Datums ist, hat wiederum eine Reihe wichtiger Vorgänge unserem Verständnis näher gebracht, vor allem auf dem so schwierigen Gebiete der Physiologie des Zentralnervensystems. Ihre Bedeutung für die Erscheinungen der Erregungsleitung werden wir im folgenden erfahren.

Bisher haben wir den Erregungsvorgang besprochen, wie er sich als primärer Reizerfolg am Orte der Reizung selbst abspielt. Aber die Erregung bleibt nicht lokalisiert, sondern sie pflanzt sich fort, breitet sich über das betroffene lebendige System aus, indem die primäre Gleichgewichtsstörung, die durch den Reiz gesetzt wurde, zu weiteren Störungen des Gleichgewichts der umgebenden Teile führt. Wir hatten diesen *Ausbreitungsprozeß der Erregung* als sekundären Reizerfolg bezeichnet. *Jede Form der lebendigen Substanz besitzt diese Eigenschaft, Erregungen räumlich fortzuleiten* und zu übertragen, wenn auch die einzelnen in sehr verschiedenem Maße. Nur durch Erregungsleitung ist ein geordnetes Zusammenarbeiten der verschiedenen Zellsysteme eines Organismus ermöglicht. Aber wohlgemerkt, es ist der Erregungsvorgang, der sich fortpflanzt, nicht der Reiz. Der Reiz, sei es Druck oder Wärme oder Elektrizität, kann sich wohl physikalisch am Reizort über einen gewissen Raum ausbreiten und so eine Vielzahl einzelner erregbarer Elemente treffen, so daß sich der Gesamterfolg summiert mit zunehmender Reizstärke. Die Erregung aber ist in ihrem weiteren Ablauf über die lebendige Substanz streng an das Elementargebilde gebunden, in dem sie ausgelöst wurde; sie springt nicht über auf anatomisch benachbarte Elemente, sondern sie löst nur da, selbst als Reiz wirkend, wiederum Erregungen aus, wo sie physiologische Verbindungen findet. So können wir z. B. auch die streng isolierte Leitung in den feinsten Nervenfibrillen verstehen, ohne welche es keine geordnete Tätigkeit unseres Zentralnervensystems gäbe.

Die *Fortpflanzung der Erregungswelle* kann man vergleichen mit dem Fortschreiten der Schwingungswelle an einem Seil oder mit der Ausbreitung des Wellenringes auf einer Wasserfläche. Teilchen nach Teilchen wird von der Schwingung ergriffen. Die Geschwindigkeit dieser Ausbreitung ist außerordentlich verschieden und von mannigfachen Faktoren abhängig. Wie jede Form lebendiger Substanz ihre spezifische Erregbarkeit besitzt, so hat sie auch ihre spezifische Leitungsgeschwindigkeit für die gesetzte Erregung. Beide gehen gewissermaßen parallel.

Die *Leitungsgeschwindigkeit* der Erregung zeigt in aufsteigender Entwicklungsreihe der Organismen mit der immer feineren Differenzierung ihrer Einzelorgane eine gewaltige Zunahme. Beträgt sie im Protoplasma Einzelliger, z. B. in den Pseudopodien der Rhizopoden, nur Bruchteile von Millimetern in der Sekunde, so erreicht sie im Muskel des Menschen bereits mehrere Meter pro Sekunde. Seine höchste Ausbildung erfährt der Mechanismus der Erregungsleitung in der Nervenfaser, die als spezifisches Leitungsorgan für Erregungen differenziert ist. Hier finden wir daher die höchsten Leistungsgeschwindigkeiten mit 50, nach neuen Untersuchungen gar über 100 m pro Sekunde für den menschlichen Nerven. Man kann die Geschwindigkeit der Erregungsleitung bestimmen, indem man einen Nerven nacheinander an zwei räumlich getrennten Punkten reizt und dann an der graphisch verzeichneten Kurve der Muskelzuckungen ausmißt, um wieviel später die Kontraktion bei Reizung von dem entfernteren Punkt aus beginnt.

Auf Grund unserer Kenntnisse über den Erregungsvorgang müssen wir uns das Fortschreiten desselben über die Länge der lebendigen Substanz so vorstellen, daß Querschnitt nach Querschnitt in ihr von der zweiphasischen Stoffwechselschwankung der Erregung ergriffen wird, indem die beim Zerfall jeweils freiwerdende Energie den Reiz darstellt für den Zerfall im benachbarten Querschnitt.

Der Nerv, der Herzmuskel und wahrscheinlich auch der Skelettmuskel, also die vorerwähnten *isobolischen Systeme, leiten* unter normalen Bedingungen *„dekrementlos"*. D. h. die Erregungswelle erfährt bei ihnen während ihres Ablaufs über die ganze Länge des Organes keinerlei Ein-

buße, weder an Größe noch an Geschwindigkeit. Sie kommt genau so am Ziele an, wie sie den Ausgangsort verließ.

Dagegen leiten alle *heterobolischen Systeme mit Dekrement*. In ihnen nimmt die Erregungswelle fortschreitend an Größe und Geschwindigkeit ab und kann, ist die Strecke lang genug, erlöschen, ohne das Ende des betreffenden Systems erreicht zu haben. Ein derartiges Erlöschen der Erregung kann selbst in den meterlangen Bahnen unserer Nerven, solange sie unter natürlichen Bedingungen und also isobolisch bleiben, nicht vorkommen. Machen wir den Nerven aber z. B. durch *Sauerstoffentziehung* heterobolisch, so erhält er sogleich ein starkes Dekrement der Leitung. Zur Aufhellung dieser Erscheinungen diene folgendes:

Haben wir ein isobolisches System vor uns, so liefert jeder Querschnitt, der von der Erregung erfaßt wird, durch seinen restlosen Zerfall („Alles oder Nichts") eine maximale Erregung. Daher muß die fortschreitende Erregungswelle maximal bleiben. Nehmen wir dagegen eine heterobolische Substanz, in welcher die Erregungsgröße von der Reizstärke abhängt, so erfolgt schon im ersten Querschnitt kein maximaler Zerfall; die dem zweiten Querschnitt als Reiz aus dem untermaximalen Zerfall des ersten gelieferte Energiemenge ist daher kleiner als der Reiz für den ersten, also ist auch der Zerfall im zweiten Querschnitt wiederum kleiner. Und so nehmen die bei den Erregungen in den einzelnen Querschnitten frei werdenden Energiemengen, die immer als Reize für den Zerfall des nächsten Querschnitts dienen, und die Erregungen selbst umschichtig an Größe ab. Mit dem Dekrement der Erregungsgröße geht aber Hand in Hand ein solches der Leitungsgeschwindigkeit. Werden die Erregungen kleiner, so werden sie nicht nur weniger weit, sondern auch weniger schnell übertragen, indem die produzierte Energiemenge, die als übertragender Reiz für den nächsten Querschnitt dienen soll, kleiner ist und daher langsamer die Reizschwelle erreicht, d. h. ein längeres Latenzstadium aufweist.

Auf Grund dieser Anschauungen müssen wir annehmen, daß nur bei heterobolischen Systemen eine gewisse Abhängigkeit der Erregungsleitung von der Intensität des primären Reizes besteht, indem bei ihnen die Erregungen über um so größere Strecken und mit um so größerer Anfangsgeschwindigkeit geleitet werden, je stärker der Reiz ist. Die Erfahrung bestätigt das. Dabei bedingt der jeweilige Zustand der lebendigen Substanz den Grad der Heterobolie und damit die Stärke des Dekrementes.

An isobolischen Systemen, z. B. an normalen Nerven, ist jedoch nachgewiesenermaßen die Leitungsgeschwindigkeit gleichförmig und völlig unabhängig von der Reizstärke und die räumliche Leitung nur anatomisch begrenzt.

Sehr bedeutend ist bei allen Formen lebender Substanz der *Einfluß der Temperatur* auf die Geschwindigkeit der Erregungsleitung. Mit steigender Temperatur nimmt sie zu, zwischen + 5 ° und + 30 ° C etwa um das Zweifache bei Erwärmung um 10 °. Darin kommt die Beschleunigung der Lebensprozesse durch Temperatursteigerung zum Ausdruck, die dem Temperaturkoeffizienten für chemische Umsetzungen ungefähr entspricht. Außerhalb der angegebenen Breiten kommen andere Faktoren ins Spiel, die begrenzend wirken.

Nun harrt zum Schluß noch das Problem der Lösung, wie wir uns den *feineren Mechanismus der Erregungsleitung* vorzustellen haben, vor allem, welche Energieformen es sein mögen, die die Erregung räumlich übertragen.

Die alte Annahme, daß es sich um eine einfache Elektrizitätsleitung handle, etwa wie in einem Telegraphendraht, mußte fallen gelassen werden, als man den gewaltigen Unterschied zwischen Elektrizitäts- und Erregungsleitung kennen lernte. Ein einfacher physikalischer Prozeß kann uns nicht dienen zur Erklärung eines Vorganges, bei welchem chemische Umsetzungen zugrunde liegen. Es ist die zweiphasische Stoffwechselschwankung, Zerfall und Wiederaufbau, welche sich über das lebendige System ausbreitet, Querschnitt nach Querschnitt desselben ergreifend. Man könnte diesen Vorgang viel eher mit dem Abbrennen einer Zündschnur vergleichen, wobei ja auch Teilchen nach Teilchen durch Oxydation zerfällt und Energie frei wird. Der Vergleich ist nur insofern nicht zutreffend, als in der lebendigen Substanz dem Zerfall auf dem Fuße die Regeneration folgt und als bei ihr wahrscheinlich nicht die *Wärme* die Energieform darstellt, die den Verbrennungsprozeß übermittelt. Wir wissen zwar, daß Wärme bei der Erregung frei wird und können sie vielfach nachweisen, aber da die Menge der eigentlichen erregbaren Substanz sehr gering ist im Vergleich zu den großen Massen nicht direkt beteiligter Stoffe, wie z. B. Wasser mit allein ca. 70 %, auf die die Wärme sich verteilen muß, so müßten wir die Temperatur, die bei einem derartigen Wärmeverlust noch als Reiz wirken sollte, als im Moment ihres Entstehens so ungeheuer hoch annehmen, wie es mit den Lebensprozessen kaum vereinbar wäre. Außerdem erreicht ein Wärmeanstieg nur schwer die Steilheit, die wir von einem erregenden Reiz verlangen.

Viel wahrscheinlicher ist die Annahme, daß hier *elektrische Reize* in Frage kommen. Die Elektrizitätsproduktion ist eine allgemeine Eigenschaft in Erregung befindlicher lebendiger Substanz. Vielfach können wir von ihr Ströme, die Aktionsströme, ableiten und messen. Speziell am Nerven stellen diese Aktionsströme die einzige Energieform dar, die uns von seiner Tätigkeit direkt Kunde gibt. Wie kommt es zur Entstehung solcher Potentialdifferenzen in der lebendigen Substanz?

Bei der Beantwortung dieser Frage kommen

uns die neueren Erfahrungen der physikalischen Chemie zur Hilfe: Halten wir zwei verschiedene Lösungen durch eine Membran von besonderer Eigenschaft, eine sogenannte semipermeable Membran voneinander getrennt, so kann ein Austausch zwischen ihnen nicht mehr durch einfache Diffusion erfolgen. Die Membran hat die Eigentümlichkeit, gewisse Stoffe gut hindurch zu lassen, andere schlechter oder gar nicht. Es entwickeln sich also die Erscheinungen der Osmose. Da nun die in Lösungen dissoziierten Stoffe Träger elektrischer Ladungen sind, so können z. B. durch die Membran die positiven Kationen hindurchgehen, während die negativen Anionen zurückgehalten werden. Es wird sich also zwischen den beiden Seiten der Membran eine Potentialdifferenz herausstellen, die, wenn sie eine gewisse Größe erreicht hat, sich durch einen Strom ausgleichen kann.

Nun haben wir im Protoplasma der lebendigen Substanz derartige Grenzschichten von semipermeablem Charakter in Menge, die sogar in der von *Bütschli* beobachteten Schaum- oder Wabenstruktur des Protoplasmas in bestimmter morphologischer Anordnung zum Ausdruck kommen. Wir können uns auf Grund des Gesagten den Mechanismus der Erregungsleitung vielleicht folgendermaßen vorstellen: Durch einen Reiz wird ein Zerfall labiler Moleküle in einem beschränkten Bezirk lebendiger Substanz ausgelöst. Dadurch werden chemische Differenzen geschaffen zwischen dieser Stelle und den benachbarten Bezirken, die sich auszugleichen bestrebt sind. Eine einfache Diffusion wird durch die semipermeablen Grenzschichten der Bezirke (evtl. *Bütschlis* Wabenwände) verhindert, die nur gewisse Stoffe hindurchtreten lassen mit gewissen elektrischen Ladungen. Daher müssen sich als Folge der chemischen nun auch elektrische Differenzen, d. h. ein Potentialgefälle herausbilden, das sich schließlich durch einen kleinen lokalen Strom wieder ausgleicht. Dieser kleine Stromstoß wirkt dann als erregender Reiz, der im Nachbarbezirk einen Zerfall auslöst. So kann die Erregung über das ganze lebendige System verlaufen, von Querschnitt zu Querschnitt übertragen durch osmotisch-elektrische Energie.

Die Ausbreitung der Erregung in der lebendigen Substanz hatten wir oben als sekundären Reizerfolg bezeichnet. Unter dem dritten Glied des Reizvorganges fassen wir alle die Prozesse zusammen, durch welche die Erregungen äußerlich zur Erscheinung gebracht werden. Die unendliche Zahl aller Lebensäußerungen der Pflanzen und Tiere sind als tertiäre Reizerfolge aufzufassen. Ihre ungeheure Mannigfaltigkeit wird bedingt durch die Verschiedenheiten in der chemischen Zusammensetzung der einzelnen Formen lebendiger Substanz, in den auftretenden Energieformen und in den Mechanismen, an denen die Energien Arbeit leisten. Eine Besprechung dieser Verhältnisse fällt aus dem Rahmen unserer Abhandlung heraus, deren Aufgabe es sein sollte, die Grundlagen des Erregungsvorganges darzulegen, wie sie für alle Formen der lebendigen Substanz gleichermaßen Gültigkeit haben.

Literatur.

Verworn, Allgemeine Physiologie, Gustav Fischer, Jena 1919.

Verworn, Erregung und Lähmung, Gustav Fischer, Jena 1914.

Pütter, Vergleichende Physiologie, Gustav Fischer, Jena 1911.

Pütter, Studien zur Theorie der Reizvorgänge, Pflügers Archiv Bd. *171*, 1918.

Über Salzhunger und Geophagie (Erdessen) bei den Naturvölkern.

Von Med.-Rat Prof. Dr. L. Külz, Altona.

Wenn wir einem Menschen die reichlichsten Mengen der drei Hauptnährstoffe Eiweiß, Fett und Kohlehydrate dauernd in chemisch reiner Form zuführen würden, so müßte er doch schließlich zugrunde gehen. Unser Organismus bedarf noch anderer Substanzen, die an Menge zwar weit hinter den genannten zurückstehen, aber doch von lebenswichtiger Bedeutung sind. Auf eine ganze Gruppe von ihnen, deren nähere chemische Struktur noch unbekannt ist, wurde man erst neuerdings beim Studium bestimmter Stoffwechselerkrankungen aufmerksam; man hat sie wegen ihrer vitalen Bedeutung mit dem Sammelnamen der Vitamine belegt, die durch ihren Ausfall verursachten Leiden als Avitaminosen. Als eine der bekanntesten von ihnen sei die Beriberi herausgegriffen, die bei einseitiger Ernährung mit geschältem, poliertem Reis den Menschen befällt und unbehandelt unter Lähmungserscheinungen oder allgemeiner Hydropsie (Wassersucht) zum Tode führt. Da nur der geschälte, des sogen. Spelzhäutchens beraubte Reis, niemals aber der ungeschälte Beriberi verursacht, ist das Vitamin in dieser Pflanzenhülle zu suchen und besteht nach neueren Forschungen wahrscheinlich in einer organischen Phosphorverbindung. Genauer und länger bekannt ist uns eine 2. Gruppe von Substanzen als unentbehrlich für den menschlichen Stoffwechsel, die Salze, obenan das Kochsalz. Die Selbstverständlichkeit, mit der jeder Kulturmensch seinen Kochsalzbedarf in der täglichen Nahrung mühelos deckt, besteht keineswegs für alle Erdenbewohner. Ein Bild größter Salznot bot uns im Kriege Serbien, das ohne eigene Salzgewinnung von der Einfuhr abhängig war, und als diese bei unserem Vormarsch 1916 unterbunden wurde, und die geringen Vorräte aufgezehrt waren, einen ganz ungeheuren Salzhunger der gesamten Bevölkerung zeigte. Ehe Zufuhren aus Österreich und Deutschland den dringendsten Bedarf decken konnten, war Salz der von jung und alt, hoch und niedrig allerorten mit größter Leidenschaft von uns begehrte und erbettelte Artikel. Lange Zeit konnte man für Salz alles bei den Serben eintauschen. Was

dort eine akut gesteigerte, vorübergehende Kriegserscheinung war, ist für viele Naturvölker ein chronischer Zustand, ja man kann in vielen Gegenden Afrikas und der Südsee von einem Kampf ums Salz sprechen. Während sich die an der Küste des Meeres sitzenden Stämme diese unerschöpfliche natürliche Salzquelle nutzbar machen, ist der Inländer im Urzustand dem Salzhunger ausgesetzt, außer wo Steinsalz für ihn zu Tage liegt. Dieses ist denn auch seit langer Zeit ein vielbegehrter, hochwertiger Tauschartikel im Handel der Afrikaneger unter sich. Es genügt aber nicht, um den gesamten Inlandbedarf zu decken. In unserer Kolonie Neu-Guinea fehlt es dem Inländer vollkommen, und die Folge davon ist ein unwiderstehlicher Drang der salzhungrigen Stämme nach der Küste, sei es um dauernd dort Fuß zu fassen, sei es um vorübergehend sich am Salzwasser satt zu trinken und Salzvorräte mit in die Heimat zu nehmen. Von den primitiven Methoden eines solchen Salz-Inlandtransportes, die ich dort kennen lernte, wurden vor allem zwei geübt: das Mitnehmen durch Verdunsten oder Kochen konzentrierten Seewassers in riesigen hohlen Bambusstangen oder das Imprägnieren von Holzstücken mit Salzwasser, die später in der Heimat zu salzhaltiger Asche verbrannt werden. Wie stark der Drang der Inländer nach Salz sein muß, erhellt daraus, daß sie Entfernungen von mehreren Tagereisen zurücklegen und dabei stets die Gefahr feindlicher Kollision mit den Küstenstämmen oder selbst räuberischen und kannibalischen Überfall in Kauf nehmen müssen. Wo brakige Binnengewässer oder Salztümpel bekannt geworden sind, erfreuen sie sich eines gleich starken Zuspruches aus weiter Entfernung. In unseren afrikanischen Schutzgebieten gibt es mehrere solcher berühmten Salzpfannen, von denen einige sogar tausendfach vom Wild aufgesucht werden, und wohin die viehzüchtenden Eingeborenen von Zeit zu Zeit ihre Herden treiben. Der deutsche Handel nach Afrika kam durch eine jährlich immer mehr steigende Salzeinfuhr dem Bedürfnis der Neger entgegen. Die Jahresmenge allein für Kamerun hatte vor Kriegsbeginn rund 10 Millionen kg erreicht, wovon aber bei den noch mangelhaften Verkehrswegen nur wenig ins tiefere Inland gelangte und bei weitem noch nicht der Bedarf der 2½ Millionen Bewohner gedeckt war. Auf einer Expedition im Innern Südkameruns erlebte ich, daß mir die Weiber der Dörfer kilometerweit nachliefen, dauernd ihre Handteller beleckend, zum Zeichen dessen, was sie begehrten. Soweit mein geringer Vorrat reichte, wurde ihr Wunsch befriedigt, wobei ich mehrfach die Probe angestellt habe und ihnen die Wahl ließ zwischen einem Häufchen Salz und Zucker, für den sonst alle Naturkinder sehr schwärmen. Sie wählten stets das Salz und leckten meist sofort einen Teil des Geschenkes auf. Man konnte ihnen also mit Salz ihr Dasein versüßen. Ob Völker, die dauernd unter Kochsalzmangel zu leiden haben, nicht auch nachweislich Schädigungen der Gesundheit bzw. Widerstandskraft davontragen, ist nicht näher erforscht, aber nach Analogie der Ausfallserscheinungen bei anderen Nährstoffen höchstwahrscheinlich.

Außer dem uns Kulturmenschen verständlichen Kochsalzbedürfnis finden wir nun bei den Naturvölkern aller Erdteile, selbst noch bei Halbkulturvölkern wie den Chinesen, weitverbreitet die Sitte des *Erdessens*, die *Geophagie*; auch in allen unsern Kolonien, wo Verf. ihr forschend nachging, treffen wir sie an. Sie hat die verschiedenste Deutung von ihren Beobachtern gefunden, meist freilich als einer Unsitte. Ich hoffe, wir werden aus unseren Darlegungen eine neue, befriedigendere, eine biologische Erklärung gewinnen. Um als Unsitte zu gelten, ist sie, abgesehen von allen anderen Gründen, viel zu weit verbreitet. Ihre Ubiquität schließt ihre Weiterverbreitung durch Nachahmung aus und zwingt uns zu der Annahme, daß gleiche Bedingungen bei den verschiedensten Völkern die gleiche eigenartige Erscheinung zeitigten, was der Meister der Ethnologie *Bastian* in seiner etwas eigenwilligen Sprache als „Völkergedanken" bezeichnet. Das Erdessen wird in zwei verschiedenen Formen geübt, einer reinen unvermischten und einer kombinierten. Jener wollen wir uns zuerst zuwenden und vergleichend prüfen, *wer* es betreibt, *wie* es geschieht und *wie beschaffen die genossenen Erden* sind. Die ungezwungene Deutung wird sich danach von selbst ergeben.

Gelegentlich sind viele Naturmenschen ohne ersichtlichen besonderen Grund Geophagen, indem sie die betreffenden Erden als eine Art Gewürz genießen, die einen, wenn man nach dem Grunde fragt, angeblich zur Appetiterhöhung, andere zur Stuhlregelung, noch andere, weil sie ihnen Kraft verleihen sollen usw. usw. Kurz, sie sind Erdesser ohne plausiblen, bewußten Grund, gewissermaßen aus Instinkt. Demgegenüber haben wir aber drei Gruppen von Menschen, die es ganz besonders häufig und mit einer gewissen Regelmäßigkeit sind: 1. Frauen während ihrer Schwangerschaft und Nährzeit, 2. Säuglinge, denen die Mütter, wie ich's in Kamerun oft sah, von Zeit zu Zeit kleine, von ihnen eingespeichelte Erdkügelchen in den Mund schieben; 3. Patienten, die an Krankheiten leiden, welche mit hochgradiger Blutarmut einhergehen, vor allem mit der Wurmkrankheit (Ankylostomiasis) behaftete. Die eßbaren Erden Kameruns nun, die dort als Marktware zu haben sind, kamen teils als gebrannte Scheiben von 3—9 cm Dicke und ca. 10 cm Durchmesser, teils in Pulverform in den Handel, hatten weiße, graue oder rötliche Farben, waren aber stets sehr feinkörnig und hatten das glänzende Aussehen eines fetten Tones. In der folgenden Tabelle ist das Ergebnis der chemischen Analyse (auf wasserfreie Substanz berechnet) von drei dieser Erdarten angegeben und eine vierte

aus China stammende, von *Martini* und *Grothe* mitgeteilte[1]) zum Vergleich angefügt. Beide Autoren meinten übrigens das Wesen der Geophagie in einer therapeutischen Verwendung der betreffenden Erden analog der bolus alba bei Darmerkrankungen zu finden.

Herkunft der Erde	Vom Sanagafluß in Kamerun	Aus Bimbia in Kamerun	Aus Kalabar (engl.) in Kamerun eingeführt	China
Glühverlust	2,60	10,19	13,74	8,10
Kieselsäure als SiO_2	89,07	45,94	59,50	67,36
Ton als Al_2O_3 ..	4,76	21,32	22,58	16,75
Eisen als Fe_2O_3	2,29	18,14	2,49	3,95
Kalk als CaO ..	0,90	0,83	4,80	1,23
Magnesia als MgO	—	1,23	0,99	2,86
Phosphorsäure als P_2O_5	0,29	0,39	0,64	?

Sehen wir von der Tonerde und Kieselsäure als den Grundsubstanzen ab, so ist das Charakteristische und Gemeinsame aller dieser Erden ihr teilweise sogar hoher Gehalt an Eisen, Kalk und Phosphorsäure, welch letztere natürlich nicht als solche, sondern in der Bindung von phosphorsaurem Kalk in der Erde vorhanden ist. Indirekt ist auch der Tongehalt nicht belanglos, weil er erstens die Formbarkeit der Erden gewährleistet, ihre Glühbarkeit ohne Zerbröckeln ermöglicht, sie besonders fein pulverisieren läßt und dadurch auch die Möglichkeit der Ausnutzung durch die Verdauungssäfte erhöht. Gerade Eisen und Kalk sind nun diejenigen Substrate, deren unsere drei Geophagengruppen in einer weit über die Norm gesteigerten Menge bedürfen. Betrachten wir zunächst die beiden ersten, so braucht der fötale und kindliche Organismus nicht nur wie der Erwachsene den Ersatz der geringen mit Kot und Urin ausgeschiedenen Mengen der anorganischen Nährsalze, sondern eine Aufspeicherung der zum Wachstum nötigen Mengen. Diese sind besonders in der Säuglingszeit mit der höchsten menschlichen Wachstumsintensität sehr beträchtlich. Nach *Munk*[2]) ist am Wachstum des 1. Lebensjahres das Skelett mit 800—850 g beteiligt = 250 g Kalkphosphat oder 180 g Kalk, so daß allein fürs Knochenwachstum pro Tag 0,4 g Kalk mehr als der Ausscheidung entspricht, verfügbar sein müssen. Für den Aufbau der roten Blutkörperchen bedarf es des Eisens, ebenfalls mehr als der Erwachsene. Wo nimmt nun das Eingeborenenkind seinen Mineralsalzbedarf her? Fast ausschließlich aus der Muttermilch, die bei Naturkindern oft bis zum 3., ja 4. Lebensjahre seine Hauptnahrung bleibt. Es werden also hohe Anforderungen an den mütterlichen Körper in Aufnahme und Abgabe der Erdphosphate während der Schwangerschaft und langen Nährzeit gestellt, die er aus gleich zu nennenden Gründen nicht wie beim Kulturmenschen aus der täglichen Nahrung zu decken vermag. Ganz entsprechend nun diesem physiologisch gesteigerten Bedarf besteht bei den Wurmkranken und anderen schwer Blutarmen ein pathologisch erhöhtes Verlangen zum Ersatz des chronischen Blutverlustes. Beide zu erfüllen ist die Zusammensetzung der eßbaren Erden durchaus geeignet. Bei den Wurmkranken ist die Geophagie, bisweilen in krankhafter Leidenschaftlichkeit, so allgemein, daß einige Autoren sie als Grund der Infektion ansahen, was dadurch auszuschließen ist, daß der Genuß der Erden meist nach einem Trocknungs- oder Glühprozeß erfolgt, dem eventuell beigemengte Wurmlarven nicht widerstehen würden. Ich entsinne mich eines mir von Missionsschwestern zugeführten kleinen Negerkindes, bei dem die Geophagie zur „Allotriophagie" ausgeartet war, indem es außer Erden allerhand andere Dinge sich einstopfte. In einem leeren Raum isoliert, kratzte es leidenschaftlich den Kalk von den Wänden, um ihn zu verzehren. Es lag eine hochgradige Durchseuchung mit Ankylostoma vor, nach deren Heilung prompt auch diese als Unart gedeutete und behandelte Leidenschaft schwand.

Eine Tatsache nun fördert bei allen Naturmenschen den Hang zur Erdesserei und erklärt auch ihre eigentliche Übung außerhalb unserer 3 Hauptgruppen: sie haben sämtlich nicht nur unter der eingangs geschilderten Kochsalzarmut, sondern unter einem allgemeinen Nährsalzmangel ihrer Nahrung (außer NaCl also Kalium, Calcium und Magnesiumphosphat) zu leiden. Ihre vorzugsweise vegetabilischen Nahrungsmittel und selbst ihr Trinkwasser pflegen arm an Kalk und anderen Salzen zu sein, teils an sich wie alle Knollenfrüchte, Mais, Hirse, Reis usw., teils aber auch infolge einer durchgehenden, auffälligen *Armut der tropischen Böden an Phosphorsäure, Kalk und anderen Mineralstoffen,* die im Bereiche menschlicher Siedlungen noch erhöht wird durch eine irrationelle, dunglose Bodenbestellung. So sind alle tropischen Pflanzen trotz üppigen Wachstums und Saftfülle durch die große Wärme bei reichlichen Niederschlägen doch mineralsalzarm. Alle Bodenanalysen aus unseren tropischen Kolonien, um deren Durchführung sich namentlich der jüngst verstorbene Leiter des Landwirtschaftsinstitutes der Universität Halle, *Wohltmann,* verdient gemacht hat, ergaben bei ansehnlichem Stickstoffgehalt diese Armut an mineralischen Nährstoffen, über welche die üppige Vegetation leicht hinwegtäuscht. Sie teilt sich den Nahrungsmitteln des Naturmenschen mit und setzt ihn dem Nährsalzhunger aus, von dem getrieben er nach anderen Quellen seines Bedarfs suchend zu den eßbaren Erden gekommen ist.

Wir erblicken also das Wesen der Geophagie in einem ungedeckten Nährsalzbedürfnis, sei es

[1]) *Martini* u. *Grotte,* Deutsche med. Wochenschr. 1910, Nr. 19.

[2]) Handb. d. Hygiene von *Weyl,* Bd. *III,* S. 30.

einem physiologischen, sei es einem durch anämisierende Krankheiten pathologisch gesteigerten. Bei der zweiten, kombinierten Form des Erdessens sehen wir einmal eine Verstärkung bzw. Vervollkommnung der erwünschten Wirkung durch Zusatz von Kochsalz oder Pflanzenasche. Aber wir treffen auch eine in ganz andersartigem Sinne „kombinierte Geophagie" in ungeheurer Verbreitung im fernen Osten an, wo schätzungsweise 200 Millionen Menschen des ganzen indisch-malaiisch-pazifischen Kulturkreises einem geophagischen Genusse huldigen: *dem Betelkauen.* Es pflegt im allgemeinen als ein Genuß wie Rauchen, Schnupfen usw. gewertet zu werden, was es auch zweifellos ist; aber es kommt ihm meiner Überzeugung nach auch noch eine zweite biologische Bedeutung im Sinne der Geophagie zu. Der regelrechte Betelpriem enthält 3 unerläßliche Substrate: 1. das frische Blatt einer hopfenartig wachsenden Pflanze, des piper methysticum; 2. als Hauptbestandteil die Nuß der Arekapalme, die überall in den Ländern des Betelkauens mit größter Sorgfalt kultiviert wird; 3. feinpulverisierten staubartigen Kalk; bei unsern kolonialen Südseevölkern meist als gebrannter Muschelkalk gewonnen. Die aufs grüne Blatt gelegte Nuß wird reichlich mit diesem Kalk überzuckert, das Blatt um seinen Inhalt gerollt und als Priem gekaut, wobei Speichel, Arekasaft und Kalk eine intensiv ziegelrote Farbe entwickeln, die sich dem Gebiß und den Lippen des Priemenden mitteilt, so daß alle betelkauenden Völker ein dauernd tiefrot gefärbtes Mundwerk haben.

Die Hauptwirkung geht von dem Saft der Arekafrucht aus (dessen wirksamer Bestandteil, das Arecolin, als Wurmmittel im heimischen Arzneischatz Aufnahme gefunden hat) und besteht in Erzielung eines euphorischen, körperliche Anstrengungen erleichternden Zustandes. Der ausgekaute Priem wird ausgespuckt und meist sofort durch einen neuen ersetzt, so daß Leistungen von mehreren Dutzenden am Tage nichts Seltenes sind. Trotz dieser Hauptwirkung der Areka darf nie die Kalkbeilage fehlen. Daß sie tatsächlich in dem von mir angedeuteten Sinne aufzufassen ist, dafür spricht vor allem die Beobachtung, daß Betelkalk und eßbare Erden vikariierend für einander eintreten können. So haben wir im mikronesischen Inselgebiet Eilande, wo der Betel noch keinen Eingang fand, dafür aber die Geophagie getrieben wird, während auf anderen durch Einbürgerung des Betels diese verdrängt worden ist. Ferner treffen wir in Kaiser-Wilhelmsland in Neu-Guinea auf Volkstämme, die bezeichnenderweise den Kalk des Betelpriems durch eßbare Erden ersetzen. Seiner chemischen Zusammensetzung nach ist der Muschelkalk durchaus geeignet, eine entsprechende Rolle zu spielen, die wir jenen zuschrieben, und auch das aus kalk- bzw. mineralsalzarmen Böden hervorgehende Bedürfnis liegt überall vor. Eine eigenartige andere Methode, sich gebrannten Kalk zuzuführen, haben die Chamorros der Südsee, die den zum Genuß bestimmten Mais mit Kalkmilch ansetzen[1]).

Zum Schlusse sei der interessanten Tatsache gedacht, daß die menschliche Geophagie ihr Analogon in der Tierwelt hat. In Deutschland sowohl wie in den Tropen wird die „Lecksucht" der Rinder beobachtet, teils als schwer anämisierende Krankheit, sui generis, teils als Vorbote und Symptom der Osteomalakie, die ihren Grund in einer Kalkverarmung des tierischen Organismus hat. In einem der bekanntesten veterinärpathologischen Lehrbücher[2]) heißt es darüber: „Der Boden der betreffenden Gegenden ist gewöhnlich sehr arm an mineralischen Stoffen, in erster Reihe an Phosphorsäure und Kalk. Steht dabei die Bodenkultur auf primitiver Stufe und wird namentlich die Salzarmut durch geeignete Düngung nicht künstlich ersetzt, so bleiben auch die auf solchem Boden wachsenden Futterpflanzen arm an mineralischen Stoffen." Die kranken Tiere belecken den Kalkverputz ihrer Stallungen, die Eisenteile der Futterkrippe, benagen sie auch und verschlucken selbst ganze Stücke davon. In der Grassteppe Kameruns gibt es außer den erwähnten Salztümpeln ganz bestimmte Quellen, zu denen gleichfalls die Rinder für eine Reihe von Tagen getrieben werden, und auf deren Wasser sie sich mit sichtlicher Gier stürzen. Die Analysen dieser Quellen ergaben charakteristischerweise Kochsalzfreiheit bei hohem Gehalt von phosphorsaurem Kalk. Treiben die Eingeborenen die Tiere nicht von Zeit zu Zeit dorthin, so werden sie lecksüchtig. Wir sehen jedenfalls, daß die vergleichende Tierpathologie die biologische Deutung, die wir der menschlichen Geophagie gegeben haben, stützt.

Erosion und Erosionsbasis.

Von Prof. Otto Baschin, Berlin.

Ein wichtiger Teil der Arbeit, welche das fließende Wasser auf der festen Erdoberfläche ausübt, besteht in dem Transport der durch Verwitterung aus dem Zusammenhang des festen Gesteins gelösten lockeren Bodenbestandteile in ein tieferes Niveau. Dabei üben die vom Wasser transportierten Gerölle, Kiese und Sande eine schleifende Wirkung auf die Gesteinsunterlage aus, so daß die abwärts strömende Wassermasse allmählich eine Rinne ausnagt, die ihm zunächst nur als Leitweg dient. Wenn diese Furche jedoch allmählich durch die unablässige, ausfeilende Tätigkeit der mitgeführten Gesteinsbrocken so weit vertieft worden ist, daß die entstandene Hohlform die gesamte, unter normalen Verhältnissen abfließende Wassermasse aufzunehmen vermag, so nennt man sie das Bett des Wasserlaufes. Die abtragende Arbeit desselben wirkt aber nicht nur in die Tiefe, sondern sie

[1]) Näheres im Amtsbl. fürs Schutzgeb. Neu-Guinea vom 1. Mai 1913.

[2]) *Hutyra* und *Marek*, Bd. *I*, S. 900.

erstreckt sich auch auf die seitlichen Ufer, indem durch das Tieferlegen des Bettes eine Neigung der Gehänge an den Seiten entsteht, wodurch für die zu beiden Seiten des Wasserlaufes niedergehenden Regenmengen ein Gefälle nach diesem hin geschaffen wird. Die abtragende Tätigkeit des strömenden Wassers hat somit auch ein allmähliches Zurückweichen der beiden Uferböschungen zur Folge. Das Flußbett wird zum Flußtal, dessen Tiefe und dessen Breite oft ein recht erhebliches Ausmaß erreichen können. Diese abtragende und vertiefende Wirkung, welche das fließende Wasser auf die Erdoberfläche ausübt, bezeichnet man in der geographischen Wissenschaft gemeinhin als Erosion, und wir verdanken *Alfred Philippson*[1]) eine der ersten und besten wissenschaftlichen Darstellungen der Erosion, ihrer Wirkungen und ihres Endzieles. Er wies nach, daß ein Fluß, wenn er seine Erosionsarbeit vollendet hat, von der Quelle zur Mündung an Gefälle stetig abnimmt. Sein Gefälle bildet also eine Kurve, deren Krümmungsradius nach der Mündung zu immer größer wird, um sich schließlich asymptotisch der Horizontalen zu nähern. Diese Endkurve der Erosion, deren Form von verschiedenen geographischen Faktoren abhängt, nennt *Philippson* die Erosionsterminante. Sie stellt einen theoretischen Endzustand dar, dem die Gefällskurve zustrebt, ohne ihn jedoch in Wirklichkeit völlig zu erreichen, und sie gehört somit zu der Klasse jener dynamischen Gleichgewichtsformen der Erdoberfläche, auf welche in dieser Zeitschrift bereits früher hingewiesen worden ist[2]).

Von größter Bedeutung nun auf den Verlauf der Erosionsarbeit eines Flusses und somit auch auf die Form der Erosionsterminante ist die Höhenlage desjenigen Niveaus, in welchem die Erosionstätigkeit völlig aufhört, bis zu welchem also das Land in der Theorie abgetragen werden kann. Man bezeichnet es meist als Erosionsbasis, wohl auch als absolutes unteres Denudationsniveau[3]). Oberhalb dieses Niveaus kann die Erosion wirken, unterhalb desselben ist sie unmöglich. Hebt sich die Erosionsbasis, so tritt eine Verlangsamung der Erosionstätigkeit ein; sinkt sie, so setzt die Erosion mit vermehrter Kraft ein. Wie man sieht, bietet also die Annahme von Hebungen und Senkungen der Erosionsbasis eine ziemlich weitgehende Möglichkeit, für nachgewiesene Änderungen der Erosionstätigkeit eine glaubwürdige Erklärung zu geben.

Durch welche Fläche unserer Erde aber wird die theoretische Erosionsbasis verkörpert? Sieht man von örtlichen Erosionsbasen ab, wie sie z. B. jeder kleinere See für die in ihn mündenden Flüsse darstellt, so wird als allgemeine Erosionsbasis in den maßgebenden Lehrbüchern der Geologie, Geomorphologie und Geographie fast allgemein der Meeresspiegel angegeben. Es wird dabei mehrfach ausdrücklich betont, daß unterhalb des Meeresspiegels ein Fluß nicht mehr erodieren könne. So heißt es z. B.: „Für alle das Meer erreichende Flüsse bildet der Meeresspiegel die Fläche, unter die die Talaustiefung nicht hinabgehen kann[1]),“ und: „Das Flußnetz einer Gegend liegt nicht still, sondern erfährt fortschreitende Vertiefung, solange bis kein Gesteinstransport im Wasser mehr möglich ist. Dieses Endziel wird erst bei ganz minimalem Gefälle erreicht, so daß die Flüsse bis nahe zum Meeresniveau einschneiden können[2]).“ Nun ist es jedoch eine bekannte Tatsache, daß der Boden des Flußbettes bei größeren Strömen in der Nähe ihrer Mündung fast stets unter das Meeresniveau hinabreicht, und zwar oft bis in recht beträchtliche Tiefen. Wäre also das Meeresniveau tatsächlich die Erosionsbasis, so müßten diese Flußbetten entweder auf andere Weise als durch Erosion entstanden, oder sie müßten nachträglich durch eine sogenannte positive Strandverschiebung[3]) unter dem Meeresspiegel gelangt sein. Beide Möglichkeiten sind natürlich in Einzelfällen denkbar, dagegen erscheint es ausgeschlossen, daß beide oder eine derselben für die Mündungsgebiete wohl aller großen Ströme zutreffen sollten. Es ist auch gar kein Grund zu der Annahme vorhanden, daß der Meeresspiegel der Erosion eine Grenze setzt. Denn solange die Wassermassen eines Flusses sich nach dem Meere hin bewegen, sind sie imstande zu erodieren, und werden dies auch tun, ohne Rücksicht darauf, ob der Boden ihres Bettes höher oder niedriger liegt als der Meeresspiegel. Im Unterlaufe des Amazonenstromgebietes liegt auf Strecken von insgesamt mehr als 1000 km Länge der Boden der Flußbetten unter dem Meeresspiegel, und zwar stellenweise bis zu 100 m und mehr. Trotzdem dürfen wir annehmen, daß die ungeheuren Wassermengen, welche dieser wasserreichste Strom der Erde ins Meer wälzt, heute noch auf die Sohle des Bettes eine starke erosive Tätigkeit ausüben, und es ist keineswegs ausgeschlossen, daß sich diese nach der Einmündung in das Meer auch noch auf dessen Boden erstreckt. Die vorwärts drängende Kraft des Flusses, die in jeder Sekunde 120 000 cbm Wasser in das Meer hinausschieben soll, ist sicherlich imstande, unter Zuhilfenahme der mitgeführten Sandmassen auf dem

[1]) Ein Beitrag zur Erosionstheorie. Von *A. Philippson*, Petermanns Mitteilungen, Gotha 1886, Bd. *32*, S. 67—79.

[2]) Der Einfluß des dynamischen Gleichgewichtes auf die Formen der festen Erdoberfläche, von *Otto Baschin*. „Die Naturwissenschaften“, Berlin 1918, Bd. *6*, S. 355—358.

[3]) Morphologie der Erdoberfläche. Von *Albrecht Penck*. 1. Teil. Stuttgart 1894, S. 367.

[1]) Lehrbuch der Geologie. Von *E. Kayser*. 5. Aufl., I. Teil. Stuttgart 1918, S. 464.

[2]) Morphologie der Erdoberfläche. Von *Albrecht Penck*. I. Teil. Stuttgart 1894, S. 367.

[3]) Ein von *Eduard Sueß* eingeführter neutraler Ausdruck für Senkung des Landes oder Ansteigen des Meeres, dem die Bezeichnung „negative Strandverschiebung“ für Hebung des Landes oder Sinken des Meeresspiegels gegenübersteht.

Grunde des seichten Schelfmeeres Rinnen auszuschürfen.

Wenn wir dies aber zugeben, so müssen wir auch die Erosionsbasis unter den Meeresspiegel verlegen. Ebenso einleuchtend ist jedoch, daß man nun kein bestimmtes Niveau als Grenze der Erosion mehr annehmen kann. Soweit das Wasser des Meeres sich bewegt, ist eine Erosion des Untergrundes möglich. Wir wissen z. B., daß in der Straße von Messina die unter dem Einfluß der Meeresströmung über den Boden hinwegtreibenden Sand- und Kiesmassen häufig die Telegraphenkabel durchscheuern. Bis in welche Tiefen diese Art von submariner Erosion reicht, ist nicht bekannt. Wir müssen aber darauf gefaßt sein, daß sie bis in die größten Tiefen hinab wirksam sein kann, und daß somit als Erosionsbasis die tiefste Stelle des Meeres, also der tiefstgelegene Teil der festen Erdkruste in Betracht kommt. Wenn *W. Ule*[1]) demnach die tiefste Stelle des Landes als Erosionsbasis definiert, so kommt er der Wahrheit näher als diejenigen Autoren, welche die Erosionsbasis in eine Niveaufläche verlegen. Seine Definition wird allgemeingültig, wenn man das Wort Land durch die Bezeichnung feste Erdkruste ersetzt.

In den vorstehenden Ausführungen habe ich mich auf die Erörterung der Vorgänge bei der Erosion durch fließendes Wasser beschränkt, obwohl auch Gletscher und bewegte Luft, wenngleich in erheblich schwächerem Maße als das Wasser, erodieren. Die Wirksamkeit dieser beiden Agentien gestaltet sich naturgemäß etwas anders als diejenige des Wassers, doch trifft der Begriff der Erosion auch auf ihre Arbeitsleistung zu. Unter der Beziehung Erosion faßt man ja in der Regel zwei Vorgänge zusammen, einmal das Abräumen der lockeren Bestandteile des Bodens, die Ablation, und dann die Abschleifung des festen Gesteins, die Korrasion. Diese Zweiteilung der Wirkungsweise steht einer einheitlichen Begriffsbestimmung einigermaßen im Wege und erschwert eine präzise Deutung des Vorganges. Es ist mir bisher nicht gelungen, eine völlig befriedigende, kurze und exakte Definition der Erosion in der geographischen Literatur zu finden, und ich möchte daher als solche vorschlagen *die Entfernung von kleinen Teilchen der Erdkruste aus ihrer Ruhelage durch strömende Stoffe*. Begrifflich deckt sich diese Definition mit der Auffassung von dem Wesen der Erosion, die schon *F. v. Richthofen* vor mehr als vier Jahrzehnten kundgab, doch ist weder in seinen, noch in anderen mir bekannten Veröffentlichungen der Begriff so scharf und bestimmt umgrenzt worden.

[1]) Grundriß der allgemeinen Erdkunde. Von *Willi Ule*. 2. Auflage. Leipzig 1915, S. 110.

Astronomische Mitteilungen.

Bei einigen **Veränderlichen vom δ Cephei-Typus mit sehr kurzer Periode** (kleiner als ein Tag) ist beobachtet worden, *daß die Gestalt der Lichtkurve erheblichen, schnellen Änderungen, oft innerhalb weniger Tage, unterworfen ist*, ein auffallender Umstand in Anbetracht der bemerkenswerten Konstanz der Periode des Lichtwechsels fast aller δ Cephei-Sterne und Verwandten. Obwohl die Erscheinung erst bei einigen dieser Veränderlichen — u. a. bei XX Cygni, RR Lyrae, β Cephei, 12 Lacertae — festgestellt worden ist, wird sie vermutlich bei der Mehrzahl derselben vorhanden sein. Auch bei den gewöhnlichen δ Cephei-Sternen mit längerer Periode werden Veränderungen der Lichtkurve, die jedoch weniger schnell verlaufen, seit langem vermutet. In Nr. 4992 der Astr. Nachr. teilt *Graff* eine Beobachtung dieser Art von SW Draconis (Periode 0,57 Tage) mit, die eine bereits vor mehreren Jahren gemachte Wahrnehmung von *Sperra* bestätigt. Die Form der Maxima der Helligkeit ist teils spitz, teils ganz flach. Auch bei β Cephei und 12 Lacertae wechselt die Form der Maxima zwischen einer spitzen und einer flachen. Eine Gesetzmäßigkeit in dem Wechsel dieser Formen ist bisher nicht erkennbar gewesen. Die Erscheinung dürfte für die Theorie der δ Cephei-Veränderlichen von wesentlicher Bedeutung sein. Auf Grund der Pulsationstheorie (die δ Cephei-Sterne als pulsierende Gaskugeln betrachtet) ist bisher eine Erklärung derselben noch nicht versucht worden. Mit der Fleckentheorie (Entstehung des Lichtwechsels durch die Rotation eines Körpers mit ungleichmäßig heller Oberfläche) läßt sie sich durch die Annahme von Veränderungen der Helligkeitsverteilung erklären.

Der zuerst von *Abney* entdeckte **Purkinje-Effekt der photographischen Platten**, dessen Existenz seither durch mehrere Untersuchungen von anderer Seite (*Bergstrand, Hertzsprung, Lindblad*) gesichert ist, entspricht qualitativ durchaus dem Purkinje-Effekt des Auges. *Parkhurst* versucht im Astrophys. Journ. 49, S. 203, eine quantitative Abschätzung für Seed 27-Platten und extrafokale Sternaufnahmen mit einem Zeiß-U V-Triplet von 14,5 cm Öffnung und 81,4 cm Brennweite. Das Ergebnis ist, daß systematische Unterschiede in der Gradation, welche von der Sternfarbe abhängen, nur spurweise vorhanden und gegenüber den zufälligen Fehlern zu vernachlässigen sind.

Über Eigentümlichkeiten der Nova Aquilae 3 berichtet *Barnard* im Astrophys. Journ. 49, S. 199. Im weiteren Verlauf ihrer Abnahme, etwa von Anfang Oktober 1918 ab, erschien die Nova im 40-zölligen Refraktor der Yerkes-Sternwarte nicht mehr sternenförmig wie die gewöhnlichen Sterne in der Umgebung, sondern deutlich als scharf begrenzte planetarische Scheibe. (Dasselbe hatte die Nova Persei von 1901 gezeigt.) Der Durchmesser der Scheibe wuchs von 0,8″ Anfang Oktober bis 1,8″ Mitte Dezember. Es wäre wissenswert, ob auch in großen Reflektoren, bei denen ja mangelhafte Achromasie keine Rolle spielen kann, diese Erscheinung sich darbot. Nach *Barnard*, der mit Instrumenten sehr verschiedener Größe die Helligkeit der Nova beobachtete, dürfte der planetarische Charakter des Bildes zusammen mit der abnormen Helligkeitsverteilung im Spektrum die Hauptursache dafür sein, daß Helligkeitsschätzungen und -messungen an Neuen Sternen von verschiedenen Beobachtern in der Regel so stark voreinander abweichen. *Guthnick.*

Für die Redaktion verantwortlich: *Dr. Arnold Berliner*, Berlin W 9.
Verlag von Julius Springer in Berlin W 9. — Druck von H. S. Hermann & Co. in Berlin SW 19.